

THERMIQUE ET MIX ÉNERGÉTIQUE

RECUEIL DES RÉSUMÉS

DU

CONGRÈS ANNUEL DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE

SFT 2021

1^{ER} — 3 JUIN 2021
BELFORT, WEB CONFÉRENCE

ORGANISÉ PAR

LE DÉPARTEMENT ENERGIE DU LABORATOIRE FEMTO-ST

Première partie

Prolégomènes

Parrainages

Le Congrès Français de Thermique, SFT 2021, organisé par l'Institut FEMTO-ST département Energie à Belfort a bénéficié du parrainage et du soutien des institutions et des organismes suivants :

Université de Franche-Comté

1 rue Claude Goudimel
25030 Besançon Cedex
www.univ-fcomte.fr



CNRS

3 rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
www.cnrs.fr



Comue Université Bourgogne Franche-Comté

32, avenue de l'observatoire
25000 Besançon
www.ubfc.fr



Institut FEMTO-ST

15B avenue des Montboucons
25030 Besançon cedex
www.femto-st.fr



Fédération de recherche FCLAB

Rue Thierry Mieg
F-90010 Belfort
www.fclab.fr



Ecole Universitaire de Recherche EIPHI

32 avenue de l'Observatoire
25044 Besançon Cedex
<https://gradschool.eiphi.univ-bfc.fr>



ANR-17-EURE-0002

UFR Sciences Techniques et Gestion de l'Industrie

4 Place Tharradin
BP 71427
25211 Montbéliard Cedex
<http://stgi.univ-fcomte.fr>



IUT Belfort-Montbéliard

19 av. du Maréchal Juin
BP 527
90016 Belfort cedex
www.iut-bm.univ-fcomte.fr



Université de Technologie de Belfort Montbéliard

Techn'Hom
13 rue Thierry Mieg
90000 Belfort
www.utbm.fr



Région Bourgogne Franche-Comté

Hôtel de Région
4 sq Castan, CS 51857
25031 Besançon Cedex
www.bourgognefranche-comte.fr



Conseil départemental du Territoire de Belfort

6 Place de la Révolution française
90020 Belfort cedex
www.territoiredebelfort.fr



Ville de Belfort

Mairie de Belfort
Place d'Armes
90000 Belfort
www.belfort.fr



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



Teledyn FLIR

40, av de Lingenfeld
77200 Torcy, France

www.flir.fr

Contact : Patrice BALCON

☎ 06 26 26 85 75

✉ patrice.balcon@flir.fr



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

ANANKE

14 Rue des Entrepreneurs,
Parc Technologique, 90000 Belfort, France

www.ananke.eu

Contact : Brice BRYON

☎ 07 79 43 56 77

✉ contact@ananke.eu



Comité d'organisation

Équipe locale

Le congrès de la SFT 2021¹ s'est déroulé sous la forme d'une web-conférence du 1^{er} au 3 juin 2021 sur le thème **THERMIQUE et MIX ENERGETIQUE**. Il a été organisé par les personnels des équipes de recherche THERMIE et SHARPAC du département Energie² de l'Institut FEMTO-ST et de la fédération de recherche FCLAB³.

Président :	François Lanzetta
Comité scientifique :	Philippe Baucour, Sylvie Bégot, Valérie Lepiller
Secrétariat et organisation locale :	Isabelle Christen, Karine Diez
Support Informatique :	Jean-Michel Carirand, Jérôme Rabouille
Support Web :	Audrey Dupuis de la société Insight-Outside ⁴
Site web-conférence :	Amélie Sonzogni-Girardot, TNT Events ⁵

Membres : Dimitri Bonnet, Philippe Désévaux, Eric Gavignet, Théo Kziazyk, David Ramel, Jean-Claude Roy, Nadia Steiner, Yacine Aït Oumeziane, Daniel Hissel, Guillaume Layes.

Comité Scientifique de la SFT

Christophe Le Niliot (président)	IUSTI, Marseille	Nadine Allanic	GEPEA, Nantes
Jérôme Bellettre	LTeN, Nantes	Jocelyn Bonjour	CETHIL, Lyon
Didier Delaunay	LTeN, Nantes	Bernard Desmet	LAMIH, Valenciennes
Stéphane Gibout	LATEP, Pau	Patrick Glouannec	LIMATB, Lorient
Michel Gradeck	LEMETA, Nancy	Souad Harmand	LAMIH, Valenciennes
Christophe Journeau	CEA, Cadarache	Joël Lallier	THALES, Elancourt
François Lanzetta	FEMTO-ST, Belfort	Najib Laraqi	LTIE, Ville d'Avray
Philippe Le Masson	LIMATB, Lorient	Pierre Millan	ONERA, Toulouse
Céline Morin	LAMIH, Valenciennes	Michel Pons	LIMSI, Orsay
Fabrice Rigollet	IUSTI, Marseille	Benoît Rousseau	LTeN, Nantes
Patrick Salagnac	LASIE, La Rochelle	Didier Sauray	Pprime, Poitiers
Franck Vouzelaud	THALES, Elancourt		
Fabrice Laturelle	Ariane Group, Saint Médard en Jalles		

1. www.congres-sft.fr/2021/

2. www.femto-st.fr/fr/Departements-de-recherche/ENERGIE/Presentation

3. www.fclab.fr/

5. www.insight-outside.fr/

5. <http://www.tnt-events.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.

Nadine Allanic	Vincent Ayel	Jean-Luc Bailleul
Francoise Bataille	Philippe Baucour	Jean-Pierre Bedecarrats
Sylvie Begot	André Bergeron	Jean Jacques Bezian
Nicolas Blet	Rodolphe Bolot	Dimitri Bonnet
Daniel Bougeard	Pascale Bouvier	Nicolas Boyard
Cyril Caliot	Didier Chamagne	Victorin Chegnimonhan
Xavier Chesneau	Eric Chénier	Benedicte Cuenot
Alain Degiovanni	Eric Delacourt	Fabien Delaleux
Didier Delaunay	Agnès Andrée Delmas	Philippe Desevaux
David Donjat	Eva Dorignac	Marie-Christine Duluc
Jean Pierre Dumas	François Durier	Claude-Gilles Dussap
Yann Favennec	Stéphane Fohanno	Jean-Pierre Fradin
Gilles Fraise	Jean-Laurent Gardarein	Bertrand Garnier
Rémi Gautier	Eric Gavignet	Stéphane Gibout
Rémi Gilblas	Florine Giraud	Patrick Glouannec
Michel Gradeck	Xiaofeng Guo	Philippe Haberschill
Jean-Luc Harion	Jean-Francois Hetet	Nicolas Horny
Laurent Ibos	Patrice Joubert	Christophe Journeau
Mohammed Lachi	Sylvain Lalot	Francois Lanzetta
Najib Laraqi	Guillaume Layes	Yves Lecointe
Damien Lecointe	Renan Leon	Valérie Lepiller
Tahar Loulou	Denis Maillet	Damien Meresse
Johann Meulemans	Ghislain Michaux	Mohammed Mobtil
Marie-Catherine Mojtabi	Pierre Mousseau	Christophe Le Niliot
Yacine Ait Oumeziane	Jacques Padet	Julien Pellé
Laetitia Perez	Benjamin Piaud	Thomas Pierre
Vincent Platel	Jean-Pierre Ploteau	Michel Pons
Catalin Popa	Hervé Pron	Mourad Rebay
Jean-Michel Reneaume	Philippe Reulet	Fabrice Rigollet
Simon Rouchier	Yassine Rouizi	Sebastien Rouquette
Stéphane Roux	Jean-Claude Roy	Serge Russeil
Jean-François Sacadura	Mohamed Sadli	Patrick Salagnac
Sylvain Serra	Monica Siroux	Vincent Sobotka
Jérôme Soto	Pascal Stouffs	Lounès Tadrift
Jules Voguelin Simo Tala	Cédric Thiebaut	Karim Touati
Adrien Toutant	Brice Tremeac	Benoit Trouette
Marielle Varenne-Pellegrini	Etienne Videcoq	Gerard Vignoles
Franck Vouzelaud	Belkacem Zeghmati	

Le mot du comité d'organisation

Pour la deuxième année consécutive, compte tenu de la situation exceptionnelle causée par l'épidémie de Coronavirus (covid 19), le 29^e congrès français de thermique a été annulé en présentiel.

Cependant, le Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique, en étroite collaboration avec le Comité d'Organisation et le Conseil Scientifique de la conférence, ont décidé d'organiser cette manifestation sous la forme d'une web-conférence qui se déroulera du 1^{er} au 3 juin 2021 sur le thème **THERMIQUE et MIX ENERGETIQUE**.

Les pays du monde se sont engagés, par l'accord de Paris, à réduire fortement leurs émissions de gaz à effet de serre afin de limiter l'impact du changement climatique sur nos sociétés. Le changement climatique trouve sa cause dans la production de gaz à effet de serre dont environ 70% résulte de notre consommation d'énergies fossiles et l'utilisation du charbon, du pétrole et du gaz rend la croissance non soutenable. La Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) et la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) permettront d'inscrire la transition énergétique de la France dans un mouvement national mais également dans le cadre du développement du marché intérieur européen et de la transition énergétique européenne. La PPE décrit ainsi les mesures qui permettront à la France de décarboner l'énergie afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050. En Europe, le secteur des transports est le premier consommateur d'énergie, devant ceux du bâtiment, de l'industrie et des services. La consommation énergétique de l'Europe s'est élevée à environ 1 352 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) en 2019 pour environ 447 millions d'habitants, contre environ 2 264 Mtep aux États-Unis pour environ 333 millions d'habitants, selon l'Agence internationale de l'énergie.

Le thème **THERMIQUE et MIX ENERGETIQUE** sera l'occasion de mettre l'accent sur des sujets de recherche industriels et académiques à travers cinq conférences plénières :

- M. Pierre Montagne (General Electric, Gas Power) présentera les problématiques de combustion au sein des auxiliaires de turbines à gaz ;
- M. Charles Foulquié (SAFRAN) abordera la conception des turbofans dans le domaine de l'aviation ;
- Mme. Zlatina Dimitrova (Stellantis) exposera les activités de recherche opérées dans le domaine de l'efficacité énergétique des véhicules automobiles ;
- M. Franck David (EDF R&D) balaira le panorama des activités du groupe industriel face aux enjeux énergétiques et à la nécessaire réduction des émissions de gaz à effets de serre ;
- Mme. Sylvie Lorente (Villanova university, USA) clôturera le congrès en présentant l'application de la loi constructale au stockage thermique.

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

- le groupe thématique « Transfert thermique atmosphérique et adaptation aux changements climatiques » créé en 2020 aura pour objectifs l'animation scientifique d'activités associant la thermique aux problématiques liées au climat. Cet atelier sera animé par Frédéric André, Cyril Caliot et Nicolas Ferlay ;

- les concours de l'enseignement supérieur et du CNRS feront l'objet d'une animation par Souad Harmand, pour le CNU 62, et Jean-Luc Battaglia, pour le CNRS section 10. Ces présentations, à destination notamment des jeunes chercheurs, permettront d'apporter quelques clés de compréhension et des conseils pour la préparation des concours d'enseignants-chercheurs et de chercheurs,
- l'atelier Hydrogène-énergie, à travers des exemples d'activités industrielles et de recherche, sera animé par Nadia Steiner et Olivier Joubert. Cet atelier exposera les enjeux scientifiques et technologiques de cette alternative aux énergies carbonées que représente l' ;
- Bernard Desmet présentera la banque de données thermophysiques.

Nous avons ainsi reçu 86 propositions de résumés. 50 communications ont été finalement acceptées pour publication dans les Actes du congrès annuel de la SFT 2021 et bénéficient dorénavant d'un DOI. 30 communications ont été retenues pour être présentées sous forme d'affiche uniquement. L'ensemble des travaux, représentant un total de 152 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 6 communications pour le Prix Biot-Fourier et seront proposées pour publication dans la revue *Entropie : thermodynamique – énergie – environnement – économie (ISTE)*. Le Comité local d'organisation du congrès attribuera également le Prix du meilleur poster.

La web-conférence sera l'occasion d'organiser, pour la première fois de son histoire, le 29^e congrès français de thermique de Belfort de manière totalement dématérialisée. Ainsi, toutes les 80 communications feront l'objet d'une présentation orale qui seront transmises en simultané sur des plateformes (Teams et/ou Youtube).

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 29^e congrès.

A toutes et à tous, nous vous souhaitons un très bon congrès 2021 !

François Lanzetta

Philippe Baucour, Sylvie Bégot et Valérie Lepiller

Programme

Conférences plénières

Contraintes de manipulation des « nouveaux » combustibles dans les auxiliaires de turbines à gaz

Mardi 1^{er} juin 2021 – 10h

PIERRE MONTAGNE

General Electric, Division Gas Power, Belfort

Originaire de Nancy, Pierre Montagne devient Ingénieur en mécanique diplômé de Supméca Paris en 2008. Après un projet de fin d'étude dans les moteurs d'avions au sein de Rolls-Royce, a intégré GE en 2008 dans les auxiliaires turbines à gaz de la division Gas Power. Il est spécialisé dans les systèmes auxiliaires de conditionnement et d'injection de combustibles alternatifs dans le cadre de projets complexes (gaz de synthèse, hydrogène, traitement de combustibles liquides contaminés). Il enseigne aussi la combustion au sein du Master Ingénierie Thermique et Energie à Belfort depuis 2018-2019.

La turbine à gaz est un convertisseur d'énergie réputé pour être capable de fonctionner avec un panel de combustibles très vaste, aussi bien liquides que gazeux. Dans le cadre des engagements de la lutte contre le changement climatique, les ambitions de décarbonation de l'industrie et de la production électrique vont ouvrir des perspectives d'utilisation d'une part croissante de « nouveaux » combustibles, d'hydrogène, d'ammoniac, de biogaz et de biocarburants. Ces « nouveaux » combustibles ne sont pas nouveaux par leur formulation, mais plutôt par l'ampleur de leur possible démocratisation et de l'opportunité qu'ils représentent, notamment pour alimenter des centrales thermiques. Ils ont des compositions chimiques différentes des carburants traditionnels et leur utilisation pure ou bien diluée dans ces derniers vont faire apparaître des propriétés physiques et des risques propres qu'il s'agit d'étudier en vue de préparer les adaptations nécessaires des systèmes auxiliaires de ces centrales. En particulier, les risques d'explosion dans toutes les phases d'opération de la centrale et dans des conditions de process contraignantes ont besoin d'être anticipés à travers l'estimation de leur occurrence, de leur sévérité et des moyens de prévention et de contrôle à disposition.

Conception des turbofans : progrès et enjeux

Mardi 1er juin 2021 – 14h

CHARLES FOULQUIÉ

Safran Aircraft Engines, Villaroche

Ingénieur chez Safran Aircraft Engines et enseignant vacataire à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Charles Foulquié évolue dans le domaine des machines de conversion d'énergie depuis maintenant dix ans. Son domaine d'expertise consiste dans l'étude numérique des phénomènes acoustiques et vibratoires d'origine aérodynamique appliqué aux turbo-réacteurs.

L'impact environnemental de l'aéronautique civile est une préoccupation croissante de nos sociétés. Afin de répondre à ces enjeux, les ingénieurs motoristes repoussent sans cesse les limites technologiques de leurs produits. Notamment, l'architecture moteur *turbofan* qui équipe de nos jours la flotte mondiale d'avion de ligne moyen et long-courriers est un concentré de technologie et d'innovation prodigieux. L'objet de cette conférence est d'introduire aux problématiques techniques et scientifiques rencontrés lors de la conception de ces moteurs. Une attention particulière est portée aux progrès réalisés sur le plan de l'efficacité énergétique et des nuisances acoustiques [1,2].

Le *turbofan* est une machine thermique basée sur le cycle thermodynamique de Joule-Brayton dont l'objectif est de produire une poussée par accélération d'un débit d'air. Son efficacité énergétique globale est conditionnée par son rendement thermodynamique d'une part ainsi que son rendement propulsif d'autre part. Le *fan* (voir figure) qui est responsable de 75% de la poussée est l'un des éléments constitutifs du moteur les plus critiques vis-à-vis de l'efficacité énergétique globale. Il est également une source de nuisance acoustique de premier plan à l'échelle de l'aéronef. Sa conception fait l'objet de recherches actives à la frontière entre aérodynamique, acoustique et mécanique vibratoire [3]. Une partie substantielle de la conférence lui est dédiée.

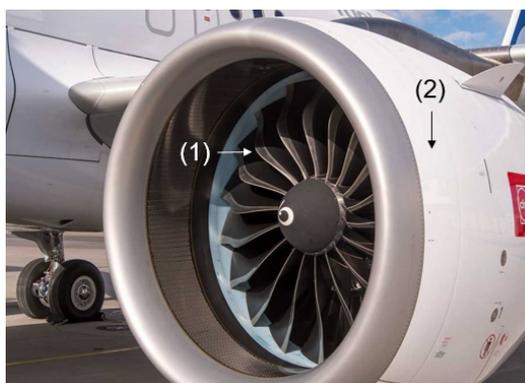


Figure 1 : Fan¹ et entrée d'air² du turbofan Leap-1A équipant l'Airbus A320Neo.

[1] La saga du CFM 56, Arts et Métiers Alumni, 23 octobre 2017, Pierre Alesi et Patrick Joyez.

[2] Advanced Air Transport Technology Project, Acoustic Considerations for PAI, NASA.

[3] Aero-engine design : a state of the art Fan Aerodynamic Design, VKI lecture series, April 7-11, 2003, Jérôme Lépine.

Systèmes de propulsion intégrés énergétiquement pour les automobiles

Mercredi 2 juin 2021 – 09h

ZLATINA DIMITROVA

Cheffe de Projet en Recherche et Innovation, Direction Recherche Innovation & Ingénierie avancée, Stellantis, Vélizy

Dr. Zlatina Dimitrova travaille dans l'industrie automobiles, chez Stellantis (ex-PSA Groupe) en tant que Cheffe de Projet en Recherche et Innovation, dans le domaine de l'énergie et de la propulsion automobile. Zlatina a obtenu son Habilitation à Diriger des Recherches en 2020 au CNAM Paris. Elle détient également un doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse).

Le fil conducteur dans cette présentation est l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques des véhicules, la réduction de leurs émissions, au travers de solutions compétitives et rentables de technologies de stockage et de conversion d'énergie. La recherche porte sur l'efficacité énergétique ainsi que sur les études d'impacts économiques et environnementaux des systèmes énergétiques innovants. Dans cette présentation les systèmes énergétiques des véhicules évoluent des systèmes autonomes embarqués vers des systèmes liés au réseau, avec des vecteurs multi-énergies. Trois grands thèmes de recherche sont développés :

- Efficacité énergétique, stockage et conversion à bord des véhicules
- Extension des systèmes énergétiques des véhicules, les véhicules en tant que systèmes liés au réseau
- Systèmes de stockage et de conversion d'énergie pour les différents vecteurs énergétiques ; véhicules électriques à pile à combustible, hydrogène et leur écosystème

Pour prendre en compte l'impact des différents vecteurs énergétiques, le bilan du puits à la roue de l'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ est réalisé et discuté pour différents systèmes de propulsion des véhicules. L'impact du mix énergétique est ainsi recensé sur les émissions de CO₂ des différents systèmes énergétiques des véhicules. La production de l'hydrogène propre ou encore vert est également abordée, en lien avec le mix énergétique.

Panorama des activités EDF R&D face aux enjeux énergétiques

Jeudi 3 juin 2021 – 9h30

FRANCK DAVID

EDF - EDF R&D, Mécanique des Fluides, Energies, Environnement, Chatou

Franck DAVID est Chercheur Senior à EDF R&D dans le domaine des échangeurs thermiques et des cycles de conversion d'énergie pour la production. Il intègre EDF en 1991 pour travailler au développement, la qualification et ainsi qu'à la réalisation des premières études du Code THYC Echangeurs (échelle 3D diphasique poreux) appliqué aux Générateurs de Vapeur et aux Condenseurs. Il a exercé des activités de management d'équipes en charge de modélisation et d'expérimentation et de pilotage de projet au sein de la R&D. Depuis 2010, il travaille en tant qu'expert dans le domaine des Nouveaux Réacteurs, des Systèmes de refroidissement pour la production et pour la Sûreté. Il a participé à différents programmes Européens dans le domaine des réacteurs Sodium, des technologies de refroidissement et des Technologies de Sûreté Passive. Il a encadré 3 thèses, produit une vingtaine de communications, est membre de la SFEN, de la SFT et du Conseil d'administration de l'association GRETH. Il intervient ponctuellement dans des activités d'enseignement.

L'entreprise EDF est un acteur majeur du monde de l'énergie en France et dans le monde. Ses activités sont multiples et couvrent les métiers de la production, du transport et de la distribution d'électricité ainsi que la commercialisation d'énergie et de service énergétique. La R&D d'EDF est une R&D « intégrée » organisée pour répondre aux différents enjeux de l'entreprise exprimés dans le cadre du plan stratégique de l'entreprise CAP 2030 et pour préparer les systèmes de productions du futur dans le cadre de la PPE et de la nécessaire réduction des émissions de gaz à effets de serre.

L'objet de la présentation est de fournir un éclairage sur les principales activités de la R&D pour répondre à ces enjeux en présentant succinctement les grandes orientations de son plan scientifique et en illustrant son programme d'activité par quelques exemples de réalisation ou des travaux de recherche en cours dans les domaines de l'énergétique et de la thermique appliqués à la production décarbonée ou aux usages.

La loi constructale et le stockage thermique

Jeudi 3 juin 2021 – 17h

SYLVIE LORENTE

Department of Mechanical Engineering, Villanova University, Pennsylvania, USA

Sylvie Lorente est le Chair Professor du Collège d'Ingénierie dans le département de Mécanique à Villanova University, PA, USA et Professeur à l'INSA Toulouse, département Génie Civil. Elle est member de l'Académie Européenne. Sylvie est passionnée par les architectures d'écoulement et travaille sur les structures vascularisées, les milieux poreux, le design et les organisations urbaines. Elle est l'auteur de 7 livres, 10 chapitres d'ouvrages et 200+ articles dans des revues internationales. Elle est éditeur de International Communications in Heat and Mass Transfer et membre de plusieurs comités éditoriaux. Elle figure parmi les 2% des scientifiques les plus cités au monde.

Enoncée en 1996 par Adrian Bejan, la loi constructale a depuis vu son potentiel d'application s'élargir dans les différents domaines de l'ingénierie, mais aussi vers d'autres horizons scientifiques tels que la physique, la biologie, la médecine, les sciences sociales, l'économie, etc. L'idée que les architectures d'écoulement s'adaptent dans le temps pour survivre en modifiant leur configuration, si elle est née en thermodynamique, est suffisamment puissante pour s'étendre vers l'explication de nombreux autres phénomènes, qu'ils soient naturels ou issus de notre imagination. De fait, la loi constructale a aussi donné très rapidement lieu à des approches originales de design.

Dans cette présentation, j'aurai le plaisir d'illustrer quelques applications que nous avons développées dans le domaine du stockage de l'énergie et des matériaux à changements de phase. Augmenter la part de la contribution des énergies renouvelables dans le mix énergétique nécessite d'accomplir des progrès dans diverses directions : remporter l'adhésion des citoyens, des mesures politiques, technologiques et des avancées scientifiques pour n'en mentionner que quelques-uns. L'un des plus grands défis consiste à offrir des solutions intelligentes pour résoudre la dichotomie entre la production d'énergie et les périodes de consommation sachant que l'écart couvre plusieurs échelles de temps. C'est tout l'objet du stockage thermique.

L'approche constructale du design de systèmes à changement de phase sera d'abord présentée. Nous montrerons que lorsque le temps de stockage est fixé, de même que le volume de matériau à changement de phase, le fluide caloporteur peut être distribué dans le volume de manière à utiliser les mécanismes de transfert de chaleur quand et où ils sont le plus efficaces. Les réacteurs de stockage thermo-chimiques sont un autre domaine dans lequel la loi constructale trouve tout son sens pour le design de réacteurs plus compacts et efficaces. Nous verrons que l'emplacement des sels peut être choisi pour décroître les imperfections thermodynamiques.

Ateliers

Climat

Mardi 2 juin 2021 – 15h30

FRÉDÉRIC ANDRÉ – INSA de Lyon, CETHIL, Lyon
CYRIL CALIOT – Université de Pau et des Pays de l'Adour, LMAP - Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications, Pau
NICOLAS FERLAY – Université de Lille, LOA - Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Villeneuve d'Ascq

Concours CNU 62 – CNRS section 10

Mardi 2 juin 2021 – 15h30

SOUAD HARMAND – Université Polytechnique des Hauts de France, LAMIH, Valenciennes
JEAN-LUC BATTAGLIA – Université de Bordeaux, I2M ENSAM, Talence

Hydrogène-énergie

Mercredi 3 juin 2021 – 11h00

NADIA STEINER – Université de Franche-Comté, Femto-st, Fclab, Belfort
DANIEL HISSEL – Université de Franche-Comté, Femto-st, Fclab, Belfort
OLIVIER JOUBERT – Université de Nantes, Institut des matériaux Jean Rouxel, fédération FRH2, Nantes

Propriétés thermophysiques – Base de données

Mercredi 3 juin 2021 – 11h00

BERNARD DESMET – Université Polytechnique des Hauts de France, Valenciennes

Prix Biot-Fourier

Six 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.

Développement et analyse d'une corrélation pour estimer les transferts de chaleur en situation de fort chauffage asymétrique d'un écoulement en canal.

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

* ✉ : martin.david@promes.cnrs.fr

¹ CNRS-PROMES (UPR 8521), Technosud-Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66100 Perpignan

Mots clés : Simulations des grandes échelles, Transferts thermique, Chauffage asymétrique, Corrélation

(Cf. page [21](#))

Vaporisation ascendante d'un mélange binaire d'HFC dans un passage d'ailettes décalées

Ines Ben El Mekki^{1,*}, Marine Andrich², Marc Wagner², Florine Giraud³, Brice Tréméac³, Pascal Tobaly³

* ✉ : ines.benelmekki@airliquide.com

¹ Doctorante AIR LIQUIDE / LAFSET CNAM

² AIR LIQUIDE

³ LAFSET CNAM

Mots clés : ailettes décalées, vaporisation ascendante, fluide binaire

(Cf. page [80](#))

Transfert de chaleur par convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires horizontales

Elhadj Boubacar Barry¹, Changwoo Kang², Harunori Yoshikawa³, Innocent Mutabazi^{1,*}

* ✉ : innocent.mutabazi@univ-lehavre.fr

¹ Université Le Havre Normandie

² Université Nationale de Jeonbuk

³ Institut de Physique de Nice - UMR 7010

Mots clés : Cavité rectangulaire ; Convection thermoélectrique ; Fluide diélectrique ; Force diélectrophorétique.

(Cf. page [25](#))

Loss effect analysis of irreversible Stirling cycle refrigerator

Muluken Z. Getie^{1,*}, François Lanzetta², Sylvie Bégot², Bimrew T. Admassu³

* ✉ : muluken.zegeye@bdu.edu.et

¹ 1. FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, F-90000 Belfort, France 2. Bahir Dar Energy Center, Bahir Dar Institute of Technology, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia 3.

² FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, F-90000 Belfort, France

³ Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Bahir Dar Institute of Technology, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia

Mots clés : Stirling refrigerator, Power losses, Heat losses, Performance, Share of losses

(Cf. page [8](#))

Analyse des transferts thermiques au sein d'un écoulement de convection naturelle dans un espace confiné comportant un obstacle partiellement chauffé.

Alexandre Weppe^{1,*}, Florian Moreau¹, Didier Saury¹

* ✉ : alexandre.weppe@ensma.fr

¹ Institut Pprime, UPR 3346 CNRS – ENSMA – Université de Poitiers, BP 40109, F-86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

Mots clés : convection naturelle, étude expérimentale, transfert de chaleur

(Cf. page [29](#))

Métrologie infrarouge haute précision pour la détermination des coefficients de transfert en condensation convective

Marion Beaumale^{1,*}, Pascal Lavieille¹, Marc Miscevic¹

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

¹ LAPLACE

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

(Cf. page [56](#))

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	xxi
Développement et analyse d'une corrélation pour estimer les transferts de chaleur en situation de fort chauffage asymétrique d'un écoulement en canal.	xxi
Vaporisation ascendante d'un mélange binaire d'HFC dans un passage d'ailettes décalées	xxi
Transfert de chaleur par convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires horizontales	xxii
Loss effect analysis of irreversible Stirling cycle refrigerator	xxii
Analyse des transferts thermiques au sein d'un écoulement de convection naturelle dans un espace confiné comportant un obstacle partiellement chauffé.	xxiii
Métrologie infrarouge haute précision pour la détermination des coefficients de transfert en condensation convective	xxiii
Table des matières	xxiii
II Résumé des communications	1
1 Conversion de l'énergie	3
Étude bibliographique des dispositifs expérimentaux pour la réfrigération magnétique	4
Estimation des pertes par courants de Foucault dans des parties massives conductrices à partir de mesures thermiques	5
Méthodologie d'étude des performances exergétiques d'un réseau anergie - Application au réseau d'Estavayer-le-lac (Suisse).	6

Estimation « in situ » de l'efficacité de capteurs solaires sous vide pour la production d'eau chaude	7
Loss effect analysis of irreversible Stirling cycle refrigerator	8
Procédé de cogénération de froid et électricité à partir d'une source de chaleur basse température	9
Etude théorique d'un micro-moteur Stirling	10
Optimisation de la machine Stirling duplex	11
Un outil d'optimisation multi-périodes pour les réseaux de chaleur solaire	12
Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration	13
Optimisation énergétique et environnementale d'un stockage thermique de type thermocline	14
Wall impact on a packed-bed thermal energy storage system efficiency	15
Comparison between simulations and experimental measurements for the optimisation of a thermocline tank distributor	16
Etude d'un moteur Ericsson à piston liquide libre.	17
Etude expérimentale du démarrage à froid de pile à combustible de type PEM	18
2 Modes de transfert	19
Caractérisation de la conductivité thermique radiale d'une fibre de carbone de type PAN par la méthode 3ω	20
Développement et analyse d'une corrélation pour estimer les transferts de chaleur en situation de fort chauffage asymétrique d'un écoulement en canal.	21
Influence de l'interaction entre ultrasons et écoulement sur l'intensification du transfert thermique : effets de la fréquence des ondes selon le régime hydrodynamique	22
Mesure thermique indirecte en temps réel dans un four radiant par modèle réduit	23
Caractérisation expérimentale d'un contact électrique glissant représentatif de la liaison pantographe-caténaire	24
Transfert de chaleur par convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires horizontales	25
Caractérisation thermique du biofouling autour d'un câble électrique dynamique sous-marin	26
Utilisation de fonctions objectives locales dans le cadre de l'optimisation topologique des échanges thermiques d'un canal vertical asymétriquement chauffé	27
Optimisation de la caractérisation thermique de l'argent fritté par la méthode flash	28
Analyse des transferts thermiques au sein d'un écoulement de convection naturelle dans un espace confiné comportant un obstacle partiellement chauffé.	29
Propagation de fumées en façade avec contamination d'un local supérieur	30
Etude du transfert radiatif dans les matériaux composites semi-transparents	31
Mesures des propriétés thermiques des bétons à base de copeaux de bois	32
Convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires	33
3 Modélisation et simulation numérique	35
Modélisation et intégration temporelle d'un problème thermique couplé par la méthode de Monte Carlo	36

Modélisation analytique d'un stockage thermocline pour la récupération de chaleur fatale ou pour centrale solaire à concentration	37
Vers un modèle thermo-optique des LEDs utilisées dans les systèmes d'éclairage automobile	38
Influence des échanges radiatifs/convectifs sur l'étalement d'une goutte de verre	39
Simulation d'un four de recuit par modèle réduit modal	40
Caractérisation thermique des fils et bobines isolés pour les machines électriques à haute température	41
La réfrigération magnétocalorique au défi du réchauffement climatique	42
Influence of tracer injection location on mixing in a curved pipe	43
Thermodynamique des chocs d'une membrane pressurisée : le cas des ballons de sport.	44
The design of new electrochemical cells for studying highly active metalloenzymes	45
Optimisation Dynamique Temps-Réel d'une centrale solaire thermique	46
Study of permanent and alternate gas flow in microchannels	47
Influence du pas hélicoïdal sur les performances thermo-hydrauliques d'un tube annulaire à parois macro-déformées	48
4 Métrologie et techniques inverses	49
Métrologie à très haute température (1300-2500°C) en pyrroreflectométrie pour des applications nucléaires	50
Validation expérimentale d'un modèle cinétique de solidification d'une plaque MCP/GNE	51
Modèles réduits ARX et produit de convolution en thermique linéaire des systèmes invariants	52
Mesure transitoire et sans contact de champ de température par thermotransmittance dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge	53
Estimation par méthode inverse du flux absorbé par une plaque en fonte destinée à la cuisson solaire	54
Développement d'un fluxmètre imageur hyperspectrale sans contact par thermographie InfraRouge	55
Métrologie infrarouge haute précision pour la détermination des coefficients de transfert en condensation convective	56
Méthode de Monte-Carlo Symbolique pour la caractérisation des propriétés thermophysiques : cas de la méthode flash	57
Mesure du flux thermique à l'interface buse/polymère dans le procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu	58
Double mesure des propriétés thermiques de nanostructures optomécaniques en silicium nanocristallin	59
Évolution de la conductivité thermique d'un lit de billes de plomb en fonction du chargement mécanique : Mesures et confrontation à la littérature	60
Optimisation d'un calorimètre différentiel pour la mesure en ligne du débit de dose absorbée dans le réacteur nucléaire de recherche du MIT.	61
5 Thermique appliquée - habitat	63

Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques	64
Réflexions sur l'utilisation de capteurs de densité de flux thermique sur un banc expérimental in situ	65
Conception de parois multi-couches pour véhicules utilitaires isothermes	66
Optimisation multicritère d'un échangeur de chaleur air-sol pour différents climats mondiaux	67
Analyse du confort thermique dans une cavité ventilée selon la position de l'ouverture de sortie	68
Modélisation CFD des performances thermiques d'un mur Trombe	69
Modélisation thermique de bâtiments intégrant le BIM et la méthode des graphes avec le module NetworkX de Python.	70
Méthodes de calibration et d'optimisation pour un système solaire combiné innovant	71
Influence d'un écoulement souterrain sur les performances d'un système de fondations géothermiques	72
Contribution à la modélisation numérique des phénomènes convectifs dans une enceinte chauffée.	73
Analyse d'un système de micro-cogénération biomasse	74
Etude de l'amélioration d'un panneau aérovoltaïque installé sur un bâtiment à faibles besoins énergétiques	75
6 Thermique appliquée - échangeur	77
Multi-objective design optimization of a hybrid renewable energy system	78
Modélisation numérique et intégration d'un désorbteur à plaques et films tombants dans un prototype de machine à absorption eau-ammoniac	79
Vaporisation ascendante d'un mélange binaire d'HFC dans un passage d'ailettes décalées	80
Optimisation des paramètres d'un échangeur de chaleur avec agitateur par la méthode taguchi et l'algorithme génétique	81
Analyse du profil de température et de création d'entropie dans un évaporateur à film tombant	82
Optimisation d'un microéchangeur à partir d'un bilan entropique	83
Étude des performances de climatiseurs individuels en climat tropical	84
Etude expérimentale et modélisation dynamique 0D d'un échangeur air-gaz brûlés pour une unité de micro-cogénération biomasse	85
Logiciel pour optimisation des échangeurs à plaques avec variabilité et adaptabilité augmentées	86
7 Transferts en milieux hétérogènes	87
Simulation de l'écoulement dispersé vapeur/gouttes dans des conditions d'APRP	88
Transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Application au séchage de la bagasse de canne à sucre par comparaison numérique et expérimentale.	89
Bulles d'eau à pression sub-atmosphérique : étude expérimentale et analyse dimensionnelle dans un canal vertical confiné	90

Modélisation individu centré de la condensation en goutte	91
Étude expérimentale de l'impact de la distribution fluide sur un stockage thermique de type thermocline	92
III Annexes	93
Liste des auteurs	95

Deuxième partie

Résumé des communications

Thème 1

Conversion de l'énergie

Étude bibliographique des dispositifs expérimentaux pour la réfrigération magnétique	4
Estimation des pertes par courants de Foucault dans des parties massives conductrices à partir de mesures thermiques	5
Méthodologie d'étude des performances exergetiques d'un réseau anergie - Application au réseau d'Estavayer-le-lac (Suisse).	6
Estimation « in situ » de l'efficacité de capteurs solaires sous vide pour la production d'eau chaude	7
Loss effect analysis of irreversible Stirling cycle refrigerator	8
Procédé de cogénération de froid et électricité à partir d'une source de chaleur basse température .	9
Etude théorique d'un micro-moteur Stirling	10
Optimisation de la machine Stirling duplex	11
Un outil d'optimisation multi-périodes pour les réseaux de chaleur solaire	12
Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration	13
Optimisation énergétique et environnementale d'un stockage thermique de type thermocline	14
Wall impact on a packed-bed thermal energy storage system efficiency	15
Comparison between simulations and experimental measurements for the optimisation of a thermocline tank distributor	16
Etude d'un moteur Ericsson à piston liquide libre.	17
Etude expérimentale du démarrage à froid de pile à combustible de type PEM	18

Étude bibliographique des dispositifs expérimentaux pour la réfrigération magnétique

Julien Eustache^{1,*}, Antony Plait¹, Frédéric Dubas¹, Raynal Glises¹

* ✉ : julien.eustache@femto-st.fr

¹ Institut Femto-ST

Mots clés : Réfrigération magnétocalorique, dispositifs expérimentaux, étude bibliographique

Résumé : L'effet magnétocalorique se traduit par une variation de température des matériaux ferromagnétiques lorsqu'ils sont soumis à une variation de champ magnétique. La magnétisation d'un matériau ferromagnétique entraîne un alignement des moments magnétiques de ses spins atomiques. Cette nouvelle organisation à l'échelle des atomes provoque une diminution de l'entropie globale et en conséquence une augmentation de température. Cet effet est réversible. En effet si le matériau est retiré du champ magnétique cela va se traduire par une désaimantation qui entraîne une diminution de sa température.

La première observation d'un phénomène thermomagnétique revient à W. Gilbert en 1600, qui note une réduction de l'aimantation d'un fil de fer quand celui-ci est chauffé. Cependant, la découverte de l'effet magnétocalorique est attribuée à E. Warburg en 1881. La mise en évidence de l'effet magnétocalorique et de sa réversibilité par A. Picard et P. Weiss en 1917 a permis une grande avancée dans le domaine. Par la suite, un intérêt plus important a été porté sur cette technologie. L'effet magnétocalorique a d'abord été utilisé au début du 19^{ème} siècle dans la réfrigération. Ce n'est que depuis quelques décennies que l'on s'intéresse à cette technologie pour des applications fonctionnant à température ambiante.

Cependant l'effet magnétocalorique seul est insuffisant pour proposer une alternative aux systèmes de production de chaud et de froid actuels. En effet, le matériau le plus utilisé et performant à température ambiante est le Gd (gadolinium). Or celui-ci présente un effet magnétocalorique ne dépassant pas 3 K/T. Afin de résoudre ce problème clé, il est nécessaire de réaliser des cycles AMRR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration). Il s'agit de parcourir des cycles d'aimantation et de désaimantation du matériau, synchronisés avec des phases de circulation fluide permettant un transfert de chaleur entre matériau magnétocalorique et fluide caloporteur circulant entre deux sources de chaleur. L'objectif est de créer un gradient de température au sein du matériau et in fine d'augmenter l'écart de température entre les sources chaude et froide.

Cette technologie présente de nombreux avantages comme en particulier une absence de polluant atmosphérique, de bruit et surtout une efficacité énergétique supérieure à celle de l'effet Peltier ou d'un cycle thermodynamique classique. Le premier prototype basé sur l'effet magnétocalorique à température ambiante a été développé par Brown en 1976. Depuis de nombreux prototypes ont vu le jour proposant un dispositif de remplacement aux systèmes actuels, et présentant des caractéristiques toujours plus performantes. Aujourd'hui, il est donc nécessaire, si l'on souhaite que cette technologie soit commercialisée à grande échelle, de concevoir un dispositif qui répondrait aux problématiques environnementales actuelles tout en proposant une efficacité et un encombrement suffisamment intéressant et compétitif.

Dans cet article, les avancés récentes dans la conception de dispositifs magnétocaloriques seront détaillées. Les prototypes les plus pertinents seront présentés et classés en fonction de leurs applications, leurs performances ou encore leur efficacité. Le but final est d'extraire une conception optimale de machine en visant un développement industriel.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-007>

Estimation des pertes par courants de Foucault dans des parties massives conductrices à partir de mesures thermiques

Antony Plait^{1,*}, Frédéric Dubas¹

* ✉ : antony.plait@gmail.com

¹ Institut FEMTO-ST, UBFC

Mots clés : Pertes, courants de Foucault, transferts thermiques

Résumé :

L'industrie automobile doit s'adapter à une profonde mutation de la mobilité et des transports individuels : une attente sociétale forte pour des solutions plus respectueuses de l'homme et de son environnement, qui mettent au centre l'énergie décarbonée et la réduction des consommations d'énergie. Dans ce sens, l'étude thermique des machines électriques a toujours été un domaine très attractif.

La recherche, réalisée dans cet article, s'inscrit dans le projet COCTEL (Conception Optimale de Chaînes de Traction Électrique) financé par l'ADEME, où il s'agit de créer un ensemble de solutions technologiques pour la traction électrique qui soient économiquement viables, et dont les performances soient comparables aux systèmes existants. Dans les machines électriques, l'estimation précise de la distribution des courants de Foucault dans les parties massives conductrices (i.e., aimants, cuivre, aluminium...) a toujours été un défi scientifique. Ces courants de Foucault, générés par une variation de champ magnétique spatio-temporel, impliquent des pertes volumiques et par conséquent des échauffements thermiques. Cela peut engendrer des conséquences irréversibles, tels que la démagnétisation des aimants dans les machines électriques. Un modèle analytique complexe a été conçu dans le but de déterminer de manière exacte la distribution des courants de Foucault, ainsi que des pertes engendrées.

À moyen terme, notre objectif est d'évaluer de manière expérimentale l'évolution de la température dans des parties massives conductrices (électrique et thermique) pour estimer les pertes par courants Foucault. Pour cela, un électroaimant à armature plate à entrefer variable, permettant ainsi d'insérer des parties massives conductrices de différentes hauteurs, est utilisé. Le champ magnétique (non-)uniforme spatialement généré est de forme sinusoïdale avec une fréquence de 50 Hz. En l'appliquant sur les parties massives conductrices en aluminium introduites dans l'entrefer, celles-ci vont s'échauffer. L'évolution temporelle de la température dT/dt mesurée expérimentalement permet d'estimer les pertes par courants de Foucault selon :

$$P = C.V.D.(dT/dt)$$

avec C la chaleur massique, V le volume et D la densité spécifique des parties massives conductrices.

La mesure de l'augmentation de température des parties massives conductrices se fait à l'aide de différents thermocouples de type E (non sensible aux variations du champ magnétique), qui sont fixés sur le matériau en différents points. Plusieurs mesures permettent d'obtenir la variation de température de manière plus fortement avérée.

L'influence de la segmentation sur l'évolution de la température et donc par conséquent sur les pertes générés par courants de Foucault est étudiée. Il est question de valider la modélisation analytique réalisée, à travers la comparaison des résultats correspondant aux différents cas d'étude.

Méthodologie d'étude des performances exergetiques d'un réseau anergie - Application au réseau d'Estavayer-le-lac (Suisse).

Yolaine Adihou^{1,*}, Malick Kane², Simon Rime³, Julien Ramousse⁴, Bernard Souyri⁴

* ✉ : yolaine.adihou@hefr.ch

¹ Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR / HES-SO Fribourg), Laboratoire d'Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (USMB)

² Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR / HES-SO Fribourg)

³ Groupe E SA, Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR / HES-SO Fribourg)

⁴ Laboratoire d'Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (USMB)

Mots clés : Exergie, Réseaux thermiques, Modélisation, Pompe à chaleur, Réseau anergie

Résumé :

Dans le but de répondre aux objectifs européens et mondiaux de réduction des émissions des gaz à effet de serre, les réseaux thermiques basse température contribuent à la transition vers des systèmes de chauffage et de refroidissement sobres. Parmi ces derniers, les réseaux anergie opèrent à des températures de l'ordre de 10°C, ce qui permet de fournir simultanément des prestations de chauffage et de refroidissement mais aussi d'intégrer des ressources énergétiques renouvelables (hydrothermie, énergie de récupération, panneaux solaires ...).

Le niveau de température de tels réseaux étant bas, il est primordial de suivre l'évolution de la température en fonction des saisons et des sources d'énergie à disposition afin d'évaluer la performance des unités de production décentralisées. En effet, la performance des pompes à chaleur (PACs) dépend du niveau de température en entrée de l'évaporateur et de la température requise par les usagers. Côté réseau, il est donc nécessaire de prévoir la température d'arrivée en sous-station afin d'évaluer au mieux les performances de l'installation.

L'analyse exergetique est reconnue comme une méthode robuste de localisation des sources d'inefficacité d'un système thermodynamique. Elle permet, contrairement au critère d'efficacité énergétique, de comparer toutes les formes d'énergies (électricité, chaleur) entrantes et sortantes d'un système thermodynamique et de localiser explicitement les pertes internes au système (pertes de charge, pertes thermiques ...).

Dans le présent article, une méthodologie d'étude des performances exergetiques d'un réseau d'anergie couplé à des pompes à chaleur décentralisées est présentée. Premièrement, la distribution de températures et de débits sur le réseau est déterminée sur l'année selon l'évolution de l'environnement externe des conduites et du niveau de température des sources d'énergie. Les modèles thermiques et hydrauliques sont calibrés en fonction des données expérimentales d'une conduite sous-lacustre de la commune d'Estavayer-le-lac (Suisse). Cette première étape permet de déterminer la distribution des températures sur le réseau et ainsi la variation annuelle de la température en entrée de l'évaporateur des PACs. Ensuite, la performance exergetique globale du réseau et notamment des PACs est étudiée selon la variation de la température de fourniture de la prestation de chauffage aux clients. La méthodologie est appliquée pour l'extension du réseau anergie d'Estavayer-le-lac dans l'objectif de prévoir les variations saisonnières de température en entrée des PACs et des échangeurs de refroidissement destinés à alimenter l'Hôpital Intercantonal de la Broye. Les performances exergetiques globales du réseau sont évaluées en fonction des niveaux de température (de la source et de la demande) afin de localiser spécifiquement les sources d'inefficacité et de fournir des recommandations explicites quant aux caractéristiques des pompes à chaleur à déployer.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-027>

Estimation « in situ » de l'efficacité de capteurs solaires sous vide pour la production d'eau chaude

Julien Gambade^{1,*}, Hervé Noël¹, Patrick Glouannec¹

* ✉ : julien.gambade@univ-ubs.fr

¹ UBS / IRDL

Mots clés : Solaire Thermique, Mesures sur site, Bilan énergétique, Tubes sous vides

Résumé :

L'Union Européenne s'est engagée à augmenter de 17 à 27% la part d'énergie renouvelable produite en Europe pour 2030 afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. C'est dans ce contexte que le laboratoire est impliqué dans le projet Interreg NWE ICaRE4Farms dont l'objectif est de réduire l'usage des procédés de chauffage traditionnels à énergies fossiles par la production d'eau chaude solaire.

Nos travaux concernent la mise en œuvre d'une instrumentation adaptée à des suivis in situ pour poser des bilans thermiques et développer des modèles numériques.

Le site étudié dans le cadre de cette étude est situé dans les Cotes d'Armor, il est destiné à produire de l'eau chaude pour un élevage.

L'installation solaire thermique utilise 24 Capteurs solaires à tubes sous vide non pressurisés avec circulation directe du fluide caloporteur dans les tubes par thermosiphon et ballon de stockage (CSSV).

Cette installation est constituée de CSSV disposés tout d'abord en série pour la montée en température de l'eau puis en parallèle pour le stockage et le chauffage complémentaire. En fonctionnement standard, deux soutirages sont effectués quotidiennement. L'installation est non pressurisée, son soutirage est effectué par pompage et son remplissage par le réseau d'adduction en eau potable.

L'objet de la communication est de présenter la métrologie mise en œuvre à l'échelle d'un CSSV et de montrer la démarche mise en œuvre afin de bien appréhender son fonctionnement et ses performances énergétiques.

L'instrumentation mise en place, outre la station météorologique implantée sur le site, comprend des capteurs de température en entrée et sortie ainsi qu'à plusieurs niveaux dans le réservoir de stockage afin d'en étudier la stratification. Un débitmètre en entrée de l'installation nous donne le débit de circulation dans la rangée de CSSV.

L'étude a pour objectif de quantifier, pour un CSSV en série, l'énergie fournie par la circulation, l'énergie stockée dans le ballon de stockage ainsi que ses déperditions et ainsi déterminer son efficacité en usage. Deux séquences expérimentales sont présentées et analysées dans cette communication.

Loss effect analysis of irreversible Stirling cycle refrigerator

Muluken Z. Getie^{1,*}, François Lanzetta², Sylvie Bégot², Bimrew T. Admassu³

* ✉ : muluken.zegeye@bdu.edu.et

¹ 1. FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, F-90000 Belfort, France 2. Bahir Dar Energy Center, Bahir Dar Institute of Technology, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia 3.

² FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, F-90000 Belfort, France

³ Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Bahir Dar Institute of Technology, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia

Mots clés : Stirling refrigerator, Power losses, Heat losses, Performance, Share of losses

Résumé :

This paper demonstrates the share of different power and heat losses on the total losses of the respective categories of a Stirling machine. The design and development of Stirling cycle refrigerators require an understanding of the processes that govern the operation of the machine. The operating condition and processes of the Stirling cycle refrigerator are accompanied by different types of losses. Power losses (including losses due to fluid friction, mechanical friction, finite speed, and gas hysteresis) tend to increase the input power requirement and heat losses (including losses due to shuttle heat, regenerator ineffectiveness, and conduction heat) that tend to decrease the amount of cooling. Different losses have been evaluated for the modified simple model using the geometrical parameters of the FEMTO–ST engine model. The share of major power and heat losses have been presented at a particular working condition. The major power and heat losses, as well as their effect on the performance of the cooling machine, have been discussed. The biggest power loss is loss due to fluid friction followed by mechanical friction loss. At a pressure of 17.5 bar, these two types of losses contribute about 94% of the total power loss. The major heat loss is loss due to regenerator ineffectiveness. Furthermore, the share of different power and heat losses for different rotational speeds have been studied as well as their effects on the performance of the cooling machine have been discussed. The share of fluid friction loss and loss due to regenerator ineffectiveness increase with rotational speed. The coefficient of performance of the refrigerating machine decrease with the rising rotational speed majorly due to the increase of fluid friction and regenerator ineffectiveness losses. Hence, the design of the Stirling refrigerator shall consider the operating range of the machine so that critical investigation could be done to minimize major losses. On the other hand, the share of heat loss is majorly dependent on the temperature gradient between the hot and cold reservoirs. This is because heat conduction loss is majorly affected by temperature difference.

Procédé de cogénération de froid et électricité à partir d'une source de chaleur basse température

Simone Braccio^{1,*}, Hai Trieu Phan², Nicolas Tauveron², Nolwenn Le Pierrès³

* ✉ : simone.braccio@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTBH. F-38000 Grenoble, France ; Laboratoire LOCIE, Université Savoie Mont Blanc CNRS UMR 5271, 73376 Le Bourget Du Lac, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTBH. F-38000 Grenoble, France

³ Laboratoire LOCIE, Université Savoie Mont Blanc CNRS UMR 5271, 73376 Le Bourget Du Lac, France

Mots clés : Cogénération ; Absorption ; eau / ammoniac, expandeur ; Turbine axiale à action ;

Résumé :

Compte tenu de la demande mondiale d'énergie toujours croissante et de l'attention à porter aux problèmes environnementaux, la communauté scientifique se concentre de plus en plus sur la recherche de nouvelles technologies de conversion d'énergie plus efficaces basées sur des sources renouvelables ou de récupération. Dans ce contexte, les systèmes énergétiques à absorption, jusqu'ici des technologies relativement de niches, se prêtent bien à la valorisation d'énergie à basse température pour la production de froid et de travail mécanique.

Le présent travail se concentre sur un système de cogénération (froid et électricité) à basse température basé sur une machine à absorption eau/ammoniac. L'étude s'appuie en partie sur un pilote expérimental de puissance thermique du générateur de 10 kW pouvant fonctionner en cogénération, actuellement partiellement opérationnel. Dans une étude précédente, l'expandeur, qui utilise la vapeur pressurisée principalement constituée d'ammoniac du cycle et qui avait été initialement sélectionné (un détendeur volumétrique de type scroll) s'est montré inapproprié pour une application de si petite taille en raison d'un débit de fuite trop élevé. Une technologie différente de production d'électricité a donc été investiguée dans la présente étude, celle d'un turbo-expandeur à action à admission partielle. Le fait que dans ce type d'expandeur toute la détente a lieu dans le distributeur devrait limiter l'influence des fuites et garantir un bon niveau de production de travail.

Un modèle 1D compressible (avec loi de gaz réel) du turbo-expandeur axial a été développé. Le distributeur du turbo-expandeur étant une tuyère convergente-divergente, l'influence des conditions d'entrée du fluide détendu sur ses performances énergétiques et sur le débit traité par celui-ci a tout d'abord été étudiée. Ensuite, après évaluation des principaux facteurs de perte au point de dessin de la turbine, la performance énergétique de la turbomachine a été déterminée en conditions hors nominales. Cette analyse a été réalisée pour différentes vitesses de rotation de la turbine, déterminant la plage de fonctionnement optimale pour différentes conditions d'entrée fixées par le cycle d'absorption et par le surchauffeur. Pour des conditions de 16 bar et 120 °C en entrée et 4 bar en sortie, le modèle intégré au cycle permet d'obtenir une puissance mécanique maximale de 750 W (rendement isentropique autour de 52 %) à 70000 RPM et un débit réfrigérant de 23.5 kg/h. Ce résultat est cohérent avec les performances attendues pour une turbine à action de petite taille de ce type.

Ensuite, le comportement de l'expandeur intégré dans le cycle global de cogénération a été étudié pour optimiser les productions d'électricité et de froid. En particulier, la relation entre le débit destiné à la production d'électricité et celui destiné à la partie du cycle produisant le froid (condenseur/évaporateur) a été analysée, en fonction de la puissance du générateur et des conditions de fonctionnement tout en tenant compte des limites imposées par la turbine. Cette étude apporte de premières informations sur l'intégration de ce type d'expandeur dans un cycle thermodynamique de cogénération tritherme à absorption eau/ammoniac, dans l'attente de résultats expérimentaux du pilote.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-036>

Etude théorique d'un micro-moteur Stirling

Sylvie Bégot^{1,*}, Muluken Getie², François Lanzetta¹, Magali Barthès¹, Michel De Labachellerie¹

* ✉ : sylvie.begot@univ-fcomte.fr

¹ FEMTO-ST

² FEMTO-ST - Bahir Dar Université

Mots clés : Stirling ; Microtechnologie ; Modélisation

Résumé :

La recherche d'économies d'énergie nous conduit à étudier des solutions de production d'énergie locales et de faible puissance destinées notamment à alimenter les objets connectés. Parmi les solutions technologiques possibles, l'utilisation d'un moteur Stirling fabriqué en micro-technologie et fonctionnant en récupération de chaleur à basse température est étudiée dans cette communication. Pour cela, une adaptation des techniques et concepts utilisés pour les machines macroscopiques est nécessaire. L'article présente tout d'abord les technologies, géométries et matériaux utilisables en micro-fabrication. A partir de cette étude, un concept de base de machine de type Alpha est proposé. Des membranes sont utilisées en lieu et place des pistons qui ne sont pas envisagés à cette échelle. Les chambres de compression et de détente et les canaux des échangeurs sont gravés dans des galettes ou wafers. Les matériaux utilisés sont le silicone pour les membranes, le silicium pour les pièces où un bon échange thermique est nécessaire, c'est-à-dire les échangeurs, et le verre pour les autres pièces. Le régénérateur utilise des micro-piliers en silicium. Un dimensionnement permettant l'obtention théorique d'une puissance de 2 mW est ensuite proposé grâce à une modélisation adiabatique du moteur incluant les pertes principales : conduction directe entre les pièces chaudes et froides, inefficacité du régénérateur, pertes de charge, pertes par hystérésis. Ensuite, une étude paramétrique est menée dans le but d'observer des différences entre le comportement théorique de cette micro-machine et celui des machines macroscopiques. Ainsi, l'influence de la fréquence de fonctionnement qui pourrait être théoriquement élevée en raison de la faible inertie des pièces de la machine est étudiée. L'utilisation des 3 gaz de travail (air, hélium, hydrogène) principalement employés dans les machines fait également l'objet de simulations. Les paramètres du régénérateur comme sa longueur et sa porosité sont étudiés. A partir de résultats cette étude en modélisation, des recommandations de conception de micro-machines Stirling sont déduites.

Optimisation de la machine Stirling duplex

Georges A. Heyihin^{1,*}, Christophe Awanto¹, François Lanzetta², Comlan Aristide Houngan³

* ✉ : gheyihin@gmail.com

¹ Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée, Université d'Abomey-Calavi

² 3FEMTO-ST, Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, 90000 Belfort

³ Laboratoire de Caractérisation Thermophysique des Matériaux et d'Appropriation Energétique, Université d'Abomey-Calavi

Mots clés : Stirling Duplex, optimisation, NSGA-II, MATLAB

Résumé :

Le présent travail décrit l'optimisation d'une machine Stirling Duplex qui est une association de moteur et de récepteur Stirling, ayant un accouplement direct et partageant le même cylindre.

Le moteur Stirling est un système de conversion d'énergie à haut rendement, simple, silencieux et très fiable non polluant et nécessitant peu de maintenance. Sa compatibilité à tout type d'énergie thermique en tant que machine à apport de chaleur externe (combustion, valorisation de rejets industriels, soleil, etc.) contribue à des intérêts scientifique et industriel.

Le système de chauffage est un échangeur constitué de tubes minces parallèles afin de présenter une grande surface d'échange et de permettre l'écoulement d'un grand débit de gaz. Le régénérateur est composé d'une matrice tubulaire à mailles en fils fins. La réversibilité du cycle Stirling est utilisée pour la génération du froid ou de la chaleur. Entraînée par un moteur, la machine devient une machine frigorifique ou une pompe à chaleur.

Chaque demi-machine du Stirling Duplex (moteur ou refroidisseur) est une machine complète et comporte les principaux éléments d'une machine Stirling à savoir le réchauffeur, le régénérateur, le refroidisseur, le déplaceur et le piston

Les paramètres géométriques (diamètre du piston, les diamètres du déplaceur-moteur et du déplaceur-récepteur, et la course des déplaceurs) sont déterminés par une optimisation multi-objectif utilisant l'algorithme NSGA2, implémenté sur MATLAB. Les fonctions-objectifs considérées sont : la maximisation du coefficient de performance et la minimisation de la masse de la machine.

Sous les contraintes dimensionnelles concernant les diamètres des pistons de puissance, des déplaceurs et de la course des déplaceurs, il ressort que les conditions optimales permettraient de dimensionner une machine Stirling Duplex de masse de 17,08 kg présentant un coefficient de performance de 0,46. Les COP frigorifique et thermique sont étudiés et il en ressort que la machine Stirling Duplex est plus performante, lorsqu'elle est utilisée en pompe à chaleur qu'en extracteur thermique.

Un outil d'optimisation multi-périodes pour les réseaux de chaleur solaire

Régis Delubac¹, Sylvain Serra^{1,*}, Sabine Sochard¹, Jean-Michel Reneaume¹

* ✉ : sylvain.serra@univ-pau.fr

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

Mots clés : Solaire thermique, réseaux de chaleur, optimisation NLP, aide à la conception, Julia (JuMP)

Résumé :

Le LaTep, Tecsol, NewHEAT et Sermet SudOuest se sont regroupés en un consortium autour du projet ISORC-OPTIMISER (financé par l'ADEME et la Région Nouvelle Aquitaine). L'une des tâches de ce projet est de créer un outil « open access » pour optimiser le dimensionnement et l'exploitation des Réseaux de Chaleur Urbains (RCU) intégrant dans leur mix énergétique du solaire thermique. Cet outil étant à destination des collectivités, bureaux d'études et entreprises, il se doit d'être à la fois performant, rapide et accessible.

L'outil est programmé en langage Julia en utilisant le package d'optimisation JuMP qui permet d'utiliser différents solveurs d'optimisation en conservant une formulation unique. Selon les conditions de fonctionnement et les besoins (taille du problème, précision désirée, temps), l'utilisateur pourra utiliser un solveur open-source ou commercial (généralement plus performant ou rapide). Le problème à résoudre étant par essence dynamique (solaire, stockage, demande variable), le choix d'une optimisation multi-périodes a été fait afin de réduire le temps de calcul.

Dans cette étude, trois jours caractéristiques (été, hiver, intersaison) sont utilisés avec un pas de temps horaire pour représenter une année. L'optimum économique est calculé sur la somme de toutes les périodes couvrant ainsi l'horizon de temps total et les coûts sont déterminés sur une période de 20 ans.

Cette contribution présente les premiers résultats d'optimisation du système complet utilisant pour l'instant un modèle simplifié pour la centrale solaire.

Ceci inclut un stockage journalier, les échangeurs de chaleur ainsi qu'une source non renouvelable (gaz) et deux renouvelables (solaire thermique et biomasse). Ce système étant soumis à une demande du réseau variable et des données météo variables dans le temps. Le problème à résoudre est de type NLP (NonLinear Programming) et les non-linéarités sont principalement dues à la fonction objectif ainsi qu'aux contraintes représentant les limites techniques des sous-systèmes.

Enfin, les principaux résultats de ce travail (dimensionnement et fonctionnement des sources) seront présentés. A terme, ces résultats serviront d'initialisation à une optimisation plus complexe détaillant plus finement la centrale solaire et ses contraintes.

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

Fabien Delaleux^{1,*}, Luca Zanatta², Pierre Arnaud², Claire Saint Laurent², Jean-Félix Durastanti¹

* ✉ : fabien.delaleux@u-pec.fr

¹ CERTES, Université Paris Est Créteil

² SIARCE

Mots clés : valorisation énergétique, solaire, STEP

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 d'une station d'épuration située à Vert-le-Grand (91) et de proposer des solutions de mise en œuvre. Cette STEP traite les eaux de 3970 équivalent habitants correspondant à une charge hydraulique de l'ordre de 1400 m³ par jour ce qui en fait une station de taille moyenne. Sa consommation énergétique moyenne de 0,79 kWh.m⁻³ traité la classe parmi la moyenne haute en termes de consommation, à procédé de traitement équivalent.

L'étude énergétique des effluents en sortie de la STEP de Vert-le-Grand montre que le débit (inférieur à 40 m³.h⁻¹ 90% du temps) et la température (entre 10 et 20°C en fonction de la saison) sont faibles et difficilement exploitables sous forme de chaleur pour alimenter un réseau urbain, d'autant plus que sa situation géographique, entourée de terres agricoles, ne le permet pas.

L'idée originale de ce projet est 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 pré-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 de la 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. Pour un ensoleillement moyen de 135 kWh/m² en période hivernale et 215 kWh/m² en période estivale, une première approche montre qu'avec environ 900 m² de surface disponible, la production d'électricité annuelle moyenne s'élèverait à plus 300 MWh, couvrant ainsi une grande part (70 à 100% suivant les hypothèses) des besoins de la STEP.

La suite du travail est de compléter cette pré-étude par une modélisation plus fine des performances et de la production attendue, 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.

Optimisation énergétique et environnementale d'un stockage thermique de type thermocline

Diane Le Roux^{1,2,*}, Pierre Neveu², Régis Olivès^{1,2}

* ✉ : diane.leroux@promes.cnrs.fr

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES-CNRS), UPR 8521. Rambla de la Thermodynamique, 66 100 Perpignan, France

² Université de Perpignan Via Domitia, 52 av. P. Alduy, 66100 Perpignan, France

Mots clés : Stockage thermique de type thermocline, énergie solaire, chaleur fatale, analyse du cycle de vie, performances énergétiques, EcoStock®

Résumé :

Pour le déploiement des énergies renouvelables et des systèmes industriels économes en énergie, le recours à des moyens de stockage, notamment le stockage thermique, devient une nécessité. En effet, ces derniers permettent de réguler les intermittences liées à l'utilisation d'énergies renouvelables, et de récupérer les rejets thermiques issus des procédés industriels.

L'objectif de cette étude est d'optimiser les impacts environnementaux et l'efficacité énergétique d'un réservoir thermocline. Dans un tel stockage sensible, un fluide caloporteur circule à travers un lit de particules. Pendant la phase de charge, le fluide chaud est injecté par le haut du réservoir et du fluide froid est extrait par le bas. Trois zones distinctes apparaissent : deux à température s uniformes (l'une haute et l'autre basse) séparées par une zone à fort gradient. Pendant la phase de décharge, le sens de l'écoulement du fluide est inversé.

Le réservoir industriel à optimiser a été développé et commercialisé par Eco Tech Ceram. Il utilise l'air comme fluide caloporteur et la bauxite en tant que solide de garnissage.

Pour décrire le comportement thermique du réservoir, six paramètres de conception définis par le cahier des charges et deux variables d'optimisation sans dimension sont utilisés. Ces deux variables d'optimisation, appelées facteurs de forme, sont liées à la géométrie du réservoir et la granulométrie des particules. Le modèle dynamique choisi est un modèle à une dimension et deux équations, une pour le fluide et une pour le solide.

Pour évaluer les impacts environnementaux, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) utilise la cuve EcoStock® comme cuve de référence pour définir l'unité fonctionnelle : « Fournir une énergie thermique déchargée égale à l'énergie déchargée de la cuve EcoStock®, pendant sa durée de vie (25 ans) ».

L'optimisation sur l'efficacité énergétique entraîne un choix de facteurs de forme amenant à une cuve effilée. Quant à l'optimisation en ACV, une cuve plus large et moins haute est obtenue. En optimisant simultanément l'efficacité énergétique et les impacts environnementaux selon différentes valeurs de pondération, un ensemble de Pareto est obtenu, limité par les deux optimisations monocritères. Plus le critère énergétique est privilégié, plus petit sont les diamètres de cuve et des particules. Concernant la hauteur de cuve, elle augmente avec la pondération énergétique. Ainsi, les résultats indiquent que l'ACV peut être améliorée, tout comme les performances énergétiques de la cuve thermocline.

Wall impact on a packed-bed thermal energy storage system efficiency

Baoshan Xie¹, Lingai Luo¹, Nicolas Baudin^{1,*}, Jérôme Soto², Yilin Fan¹

* ✉ : nicolas.baudin@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTéN), UMR CNRS 6607, Polytech' Nantes - Université de Nantes

² Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTéN), et Laboratoire Énergétique Mécanique et Matériaux (ICAM)

Mots clés : Thermal energy storage, packed bed, thermocline, heat loss, wall impact

Résumé :

Packed-bed energy storage single tank is a low-cost alternative to the conventional two-tank system for the concentrated solar power plant. In the single tank, both cold and hot heat transfer fluids are stored together and a thermal stratification is formed between two fluids by buoyancy force due to the different densities. This stratification region, called the thermocline, as an indicator of the thermal performance of the tank system, can be influenced by factors, such as, packing conditions, operating conditions, and tank geometry. Our target is to optimize influence parameters to increase both the heat storage capacity and exergy efficiency. A numerical model had first been built to study a packed-bed storage tank charging and discharging, validated against experiments. The next step will be to couple this model to optimisation algorithms to reach the target.

One of the novelty of the study is the investigation of the wall effect on the storage tank performances. Two configurations were compared : a small lab-scale storage tank, with a polycarbonate wall and nitrile rubber insulation, and an industrial-scale storage tank, with a steel wall and mineral wool insulation. A Schumann's model with temperature resolution in the wall and insulation was first used. It was found that although the influence of the wall on the industrial-scale tank was less important, the performances of the heat storage were dependant on the wall and insulation properties in both configurations. The transient heat storage in the wall can be up to 15% of the heat provided to the tank and thus an additional capacitive term corresponding to the wall is to be added in the conventional Schuman's model. The wall heat losses are time dependant due to the transient conduction in the wall but using a steady state thermal resistance keeps the model error on exergy efficiency below 5%. Finally, it was found that the wall axial conduction has a negligible effect on the thermocline thickness increase in the range of the operational parameters. These results are also validated against experimental data for the lab-scale setup.

Next step will be to verify experimentally the heat storage enhancement of a multi-layered packed-bed tank, filled with sensible material and phase change material, designed from the simulations beforehand.

Comparison between simulations and experimental measurements for the optimisation of a thermocline tank distributor

Wanruo Lou¹, Lingai Luo¹, Yilin Fan¹, Nicolas Baudin^{1,*}, Jérôme Soto², Baoshan Xie¹

* ✉ : nicolas.baudin@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTéN), UMR CNRS 6607, Polytech' Nantes - Université de Nantes

² Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTéN), et Laboratoire Énergétique Mécanique et Matériaux (ICAM)

Mots clés : Thermal energy storage, thermocline, optimum manifold configurations, experimental measurements

Résumé :

Thermocline energy storage single tanks are a low-cost alternative to the conventional two-tank systems for the concentrated solar power plant. In the single tank, both cold and hot heat transfer fluids are stored together and a thermal stratification is formed between two fluids by buoyancy force due to the different densities. This stratification region, called the thermocline, as an indicator of the thermal performance of the tank system, can be influenced by factors, such as operating conditions, tank geometry, and especially inlet and outlet distributors. Indeed, improper inlet/outlet manifolds may cause the mixing of hot and cold fluids and disturb the temperature stratification, resulting in reduced thermal performances of the storage tank. Distributor as one of the effective solutions can be applied to the storage tank to achieve a more even flow distribution. Our goal is to optimize the distributor holes diameter and position to get an even flow distribution and thus a thinner and more stable thermocline.

This work had been conducted in two parts. At first, an algorithm coupling Fluent simulations and an optimization method was designed and used to predict optimum manifold configurations. These results were presented by Lou et al. in 2019. Secondly, an experimental setup had been built to reproduce a lab-scale storage tank : Particle Image Velocimetry measurements and temperature measurements were compared with the simulation results for a base and optimized manifolds. In the experimental part, the measurements of the optimized system were conducted at different operating temperatures and with different inlet flow rates. Moreover, the system was also compared to the no optimized system with no distributors. In the end, a good agreement was found between experiments and simulations. All these efforts help to provide generalized design guidelines for a possible upscaling from the laboratory to the industrial scale for real-world CSP application.

Etude d'un moteur Ericsson à piston liquide libre.

Ryma Chouder¹, Pascal Stouffs^{1,*}, 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 piston libre, généralement couplés à un générateur linéaire, sont des systèmes de conversion d'énergie très intéressants. Parmi cette famille, les moteurs Stirling à piston libre peuvent être distingués des moteurs à piston libre à combustion interne. Les moteurs Stirling à piston libre peuvent fonctionner avec différents types de sources de chaleur comme l'énergie solaire, l'énergie nucléaire ou la combustion de la biomasse. Une configuration spéciale de moteurs Stirling à piston libre utilisant des pistons liquides est connue sous le nom de Fluidyne. Ce dispositif est constitué de deux tubes en U. Les Fluidynes sont technologiquement simples mais ils fonctionnent habituellement à basse fréquence et sont généralement limités à des applications de pompage de faible puissance, avec un rendement médiocre (généralement inférieur à 1%). Une nouvelle configuration d'un moteur à piston liquide libre consistant en un seul tube en U équipé de soupapes est présentée. Ce moteur thermique fait partie de la famille des moteurs Ericsson. Un modèle dynamique de ce moteur Ericsson à piston liquide libre a été développé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ce modèle est inspiré de la modélisation dynamique et thermodynamique des moteurs Stirling à piston libre et de la modélisation des écoulements dans les soupapes des moteurs à combustion interne. Le modèle permet de déterminer la fréquence de fonctionnement du moteur, la position instantanée du piston liquide et les propriétés instantanées du gaz de travail, de sorte que les performances globales du moteur peuvent être prédites. En exploitant ce modèle, il a été 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. Un banc expérimental est en cours de montage pour confirmer les résultats de modélisation. Les choix technologiques et l'état d'avancement de la réalisation du banc sont présentés.

Etude expérimentale du démarrage à froid de pile à combustible de type PEM

Wafa Hafsa Saidouni^{1,*}, Fabien Harel², Sylvie Bégot¹, Valérie Lepiller¹

* ✉ : wafa_hafsa.saidouni@edu.univ-fcomte.fr

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

² Université Gustave Eiffel

Mots clés : Pile à combustible, écoulements alternés

Résumé :

La pile à combustible type PEM (Proton Exchange Membrane), également appelée pile à combustible à polymère solide, a été développée en 1960 par General Electric aux Etats-Unis afin qu'elle puisse être utilisée par la NASA pour les premiers véhicules spatiaux. Le cœur de la pile est formé par l'assemblage de deux électrodes et d'une membrane échangeuse de protons. L'alimentation en gaz et le circuit caloporteur sont assurés par des plaques dites plaques bipolaires. Le démarrage d'un véhicule équipé d'une pile à combustible doit pouvoir être assuré en température négative. Or, la pile à combustible de type PEM produit de l'eau. La problématique du démarrage à froid est due à la formation d'eau dans la pile, en effet en condition de gel, de la glace se forme et empêche le démarrage de la pile.

Le but de cette étude est d'utiliser la chaleur produite lors des réactions chimiques afin de pouvoir gérer la production de chaleur nécessaire qui permet d'assurer une montée en température suffisante du système afin d'éviter la formation du gel et sans faire appel à système de chauffage extérieur. La solution proposée pour cette problématique est l'utilisation d'un écoulement alterné. Un écoulement alterné est un écoulement instationnaire périodique alterné à vitesse moyenne nulle. Nous avons conçu un banc d'essai comprenant un système d'écoulement alterné composé d'une pompe et de deux vannes trois voies, l'instrumentation est assurée par un débitmètre Coriolis, un capteur de pression différentiel et des capteurs de température de type thermocouple. Le débit est réglable par une vanne manuelle. Nous simulons la production de chaleur de la cellule par un film chauffant électrique de 100 W, sa puissance électrique est mesurée par un capteur de courant et un capteur de tension. La température du film chauffant est mesurée par une sonde PT100 et les températures des plaques bipolaires sont mesurées par des thermocouples. Le contrôle commande permet l'acquisition des mesures et le réglage de la fréquence de l'écoulement. La première campagne de mesures nous a permis d'obtenir l'évolution de la température de la pile à combustible lors du démarrage pour différentes fréquences d'oscillation, nous avons également obtenu l'évolution des pertes de charges en fonction des fréquences. Les prochaines campagnes de mesures nous permettront de déterminer des corrélations expérimentales du coefficient de frottement et du coefficient d'échange en fonction de différentes fréquences. A l'aide de ces corrélations nous serons en mesure de proposer un système optimisé pour le démarrage d'un véhicule équipé d'une pile à combustible en température négative.

Thème 2

Modes de transfert

Caractérisation de la conductivité thermique radiale d'une fibre de carbone de type PAN par la méthode 3ω	20
Développement et analyse d'une corrélation pour estimer les transferts de chaleur en situation de fort chauffage asymétrique d'un écoulement en canal.	21
Influence de l'interaction entre ultrasons et écoulement sur l'intensification du transfert thermique : effets de la fréquence des ondes selon le régime hydrodynamique	22
Mesure thermique indirecte en temps réel dans un four radiant par modèle réduit	23
Caractérisation expérimentale d'un contact électrique glissant représentatif de la liaison pantographe-caténaire	24
Transfert de chaleur par convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires horizontales	25
Caractérisation thermique du biofouling autour d'un câble électrique dynamique sous-marin	26
Utilisation de fonctions objectives locales dans le cadre de l'optimisation topologique des échanges thermiques d'un canal vertical asymétriquement chauffé	27
Optimisation de la caractérisation thermique de l'argent fritté par la méthode flash	28
Analyse des transferts thermiques au sein d'un écoulement de convection naturelle dans un espace confiné comportant un obstacle partiellement chauffé.	29
Propagation de fumées en façade avec contamination d'un local supérieur	30
Etude du transfert radiatif dans les matériaux composites semi-transparentes	31
Mesures des propriétés thermiques des bétons à base de copeaux de bois	32
Convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires	33

Caractérisation de la conductivité thermique radiale d'une fibre de carbone de type PAN par la méthode 3ω

Rodrigo A. Olaya G.^{1,*}, Bertrand Garnier¹, Ketaki Mishra¹

* ✉ : raolayag@unial.edu.co

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTeN) - Polytech Nantes

Mots clés : conductivité thermique radiale ; fibre de carbone ; méthode 3ω , quadripoles

Résumé :

La prédiction des transferts de chaleur dans les matériaux composites (époxy/fibre) nécessite la connaissance de leurs propriétés thermiques effectives. Dans un premier temps, il est important de mesurer la conductivité thermique axiale ainsi que radiale des fibres en l'occurrence en carbone et de type PAN. Contrairement à la conductivité thermique axiale des fibres de carbone, il n'y a pas beaucoup de travaux sur la mesure de leurs conductivités thermiques radiales. Le présent travail décrit la caractérisation de la conductivité thermique des fibres de carbone dans la direction radiale en utilisant la méthode 3ω avec une source de courant constante. Cette méthode utilise une seule fibre qui agit à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température. La fibre de carbone est entourée d'un matériau à forte effusivité thermique pour améliorer le transfert de chaleur radial et donc a permis d'augmenter la sensibilité de la tension 3ω mesurée à la conductivité radiale recherchée. Un modèle thermique approprié est nécessaire pour estimer la conductivité thermique radiale. Par conséquent, un modèle analytique 2D décrivant les transferts thermiques dans la fibre en régime périodique établi a été développé en utilisant la méthode des quadripoles et a été validé à l'aide d'un modèle numérique 2D. Un modèle radial 1D a été mis au point afin d'analyser l'effet du transfert de chaleur axial résiduel à l'intérieur de la fibre pendant la mesure. Une étude de sensibilité détaillée du paramètre inconnu a été effectuée afin de trouver la meilleure plage de conditions opératoires en particulier la plage de fréquences et le type de matériau environnant le plus pertinent. Les mesures ont été effectuées avec de la fibre de carbone de type PAN (BT300) de 6 à 8 micromètres de diamètre et avec différentes longueurs de 0,5 à 2,5 mm. De l'eau dé-ionisée a été utilisée comme matériau environnant. Enfin, les valeurs de conductivité thermique radiale obtenues se sont avérées beaucoup plus petites que les valeurs axiales précédemment mesurées, typiquement plus d'un ordre de grandeur inférieur.

Développement et analyse d'une corrélation pour estimer les transferts de chaleur en situation de fort chauffage asymétrique d'un écoulement en canal.

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

* ✉ : martin.david@promes.cnrs.fr

¹ CNRS-PROMES (UPR 8521), Technosud-Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66100 Perpignan

Mots clés : Simulations des grandes échelles, Transferts thermique, Chauffage asymétrique, Corrélation

Résumé :

Les travaux concernent l'étude de la sensibilité des transferts de chaleur, dans des conditions de forts chauffages asymétriques d'un écoulement turbulent en canal caractérisé par de hauts niveaux de température, par l'intermédiaire d'une corrélation. Cette étude vise à quantifier la précision de l'estimation des transferts de chaleur dans les récepteurs solaires à gaz sous-pression des centrales solaires à tour à l'aide d'un outil simple d'utilisation pour le pré-dimensionnement de ces centrales. Elle peut également être appliquée à des échangeurs de chaleur, à des systèmes électroniques ou dans le domaine du nucléaire par exemple. La corrélation utilisée est développée grâce à des Simulations numériques des Grandes Échelles (SGE). Pour mener à bien ces simulations, les équations de Navier-Stokes sont résolues sous l'hypothèse de bas nombre de Mach dans un canal plan bi-périodique mesurant 6 mm de hauteur, modélisant le récepteur solaire. Les couplages entre la thermique et la dynamique de l'écoulement (en particulier les effets de dilatation liés à la température) sont pris en compte afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement des récepteurs solaires. Les petites échelles de turbulence, non résolues en SGE, sont modélisées à l'aide du modèle sous-maille fonctionnel AMD. La corrélation proposée est en cohérence avec des expressions de références existantes et fait intervenir un nouveau terme, dédié au chauffage asymétrique. Ce terme devient neutre en cas de chauffage symétrique du fluide rendant la corrélation également utilisable dans ces conditions. La nouvelle corrélation permet d'estimer le flux de chaleur avec une précision de 10% à partir des nombres de Reynolds et de Prandtl ainsi que des températures de fluide et de parois du canal. Cette corrélation, proposée dans une publication antérieure, couvre un large domaine d'application : le nombre de Reynolds est compris entre 10 000 et 180 000, les températures de fluide étudiées s'étendent de 340 K à 1240 K et le flux de chaleur atteint $580 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Le nombre de Prandtl est dans la gamme 0,76-3,18. Dans ce travail, la sensibilité des résultats à la précision des données est étudiée puis analysée en fonction de la position dans le récepteur solaire. L'erreur commise sur le flux, en fonction de l'incertitude des mesures, est calculée. Il apparaît que les incertitudes sur les températures de fluide et de paroi froide sont critiques. En effet, une faible incertitude sur une de ces températures induit une erreur conséquente sur le flux estimé à la paroi froide. La sensibilité augmente de façon exponentielle à mesure que l'écart entre ces températures diminue, et donc que l'on progresse dans le récepteur solaire. Étant donné que le flux suit une tendance opposée, les plus grandes erreurs sont commises pour les flux les plus faibles. À la paroi chaude, l'erreur commise est moindre en raison du grand écart de température. L'influence des incertitudes sur le débit est elle aussi moins importante. Cette étude montre qu'il est possible d'adapter la précision des mesures de température en fonction de la position dans le récepteur solaire.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-008>

Influence de l'interaction entre ultrasons et écoulement sur l'intensification du transfert thermique : effets de la fréquence des ondes selon le régime hydrodynamique

Christophe Poncet^{1,*}, Sébastien Ferrouillat¹, Laure Vignal¹, Odin Bulliard-Sauret¹, Nicolas Gondrexon²

* ✉ : christophe.poncet@univ-grenoble-alpes.fr

¹ Université Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP, LEGI, 38000 Grenoble, France

² Université Grenoble-Alpes - Laboratoire Rhéologie et Procédés - LRP UMR 5520, Domaine Universitaire, 38610 Gières, France

Mots clés : Intensification des transferts thermiques ; Ultrasons ; Convection forcée

Résumé :

Plusieurs études ont montré que l'intensification des transferts thermiques générée par les ultrasons est étroitement associée à la génération d'effets hydrodynamiques à des échelles et des intensités différentes selon la fréquence choisie. Les ultrasons basse fréquence (20 – 100 kHz) sont connus pour leur capacité à intensifier les transferts thermiques, notamment en convection forcée et naturelle. En effet, l'étude hydrodynamique d'écoulements en conduite en présence d'ultrasons basse fréquence a permis de mettre en évidence une perturbation du champ de vitesses et une augmentation de la turbulence en présence de cavitation acoustique, phénomène principalement induit par ce type d'ondes. Il a également été montré que la cavitation acoustique générée à proximité d'une paroi chauffante permet de perturber l'établissement de la couche limite, et d'induire ainsi une amélioration notable des transferts thermiques.

Plus récemment, des études se sont intéressées au phénomène d'intensification thermique en présence d'ultrasons haute fréquence (> 1 MHz) pour lesquels aucune cavitation acoustique n'a été détectée. A ces hautes fréquences ultrasonores, ce sont majoritairement des courants acoustiques qui sont produits et qui sont à l'origine d'une mise en mouvement du fluide à l'échelle macroscopique. Appliqués à un écoulement, les courants acoustiques perturbent eux aussi le champ de vitesses et augmentent le mélange entre le cœur de l'écoulement et la paroi. Les courants acoustiques ont ainsi été identifiés comme les facteurs principaux responsables du phénomène d'intensification thermique observé avec des ondes de haute fréquence.

La comparaison de l'intensification du transfert thermique avec des ultrasons de fréquence différente a mis en évidence que les comportements thermiques et hydrodynamiques diffèrent. L'apport des ultrasons haute fréquence se dissipe rapidement à mesure que le débit et le nombre de Reynolds augmentent au-delà des limites du régime laminaire. A l'inverse les ultrasons basse fréquence maintiennent davantage leur capacité à intensifier les transferts thermiques même en régime turbulent. Des hypothèses ont été émises dans la littérature pour expliquer ces différences sans pour autant permettre de trancher précisément sur les mécanismes qui expliquent une telle différence.

Le travail proposé dans cette étude vise à caractériser le comportement thermique et hydrodynamique via des mesures de nombres de Nusselt et de champs de vitesse afin d'étudier les influences respectives du débit et du nombre de Reynolds sur les phénomènes d'intensification des transferts thermiques et de la turbulence en présence d'ultrasons haute et basse fréquence.

Mesure thermique indirecte en temps réel dans un four radiant par modèle réduit

Benjamin Gaume^{1,*}, Yassine Rouizi¹, Frédéric Joly¹, Olivier Quemener¹

* ✉ : b.gaume@iut.univ-evry.fr

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

Mots clés : Problème inverse ; Rayonnement thermique ; Réduction de modèle ;

Résumé :

La réduction de modèle par la méthode AROMM (Amalgam Reduced Order Modal Model) permet une forte réduction du temps de simulation tout en permettant un accès à l'ensemble de la scène thermique avec une prise en compte des phénomènes radiatifs. D'autre part, des travaux sur l'identification avec cette même méthode ont montré leur intérêt pour l'identification de flux de chaleur sur un disque de frein.

Dans la continuité de ces travaux, nous proposons ici d'utiliser la méthode AROMM, afin (i) d'identifier une source radiative variable dans le temps à partir de quelques points de mesures avec un modèle d'ordre faible, (ii) de reconstruire la scène thermique complète avec un modèle réduit d'un ordre plus important.

L'exemple traité ici porte sur un four industriel dans lequel une pièce en titane est chauffée par deux tubes radiants ayant une température variable dans le temps comprise entre 293 et 1173K. Les données d'entrées pour l'identification sont les températures de deux points de mesure sur le four, caractérisées par un bruit blanc de 2K. A partir d'un modèle réduit d'ordre 20, la source rayonnante est identifiée en temps réel sur une fenêtre de temps glissante via une procédure de minimisation utilisant l'algorithme de région de confiance. Il est alors possible de reconstruire toujours en temps réel le champ de température complet sur l'intégralité de la pièce en titane à l'aide d'un modèle réduit d'ordre 150. Le champ erreur obtenu se distingue par une erreur moyenne inférieure à 2K et une erreur maximum ponctuelle en temps et en espace inférieure à 40K.

Caractérisation expérimentale d'un contact électrique glissant représentatif de la liaison pantographe-caténaire

Théo Kziazyk^{1,*}, Baucour Philippe¹, Eric Gavignet¹, Didier Chamagne¹

* ✉ : theo.kziazyk@femto-st.fr

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

Mots clés : Banc d'essais, Mesures thermiques, Instrumentation, Résistances de contact, Coefficient de partage de flux, Electrothermie

Résumé :

Les problématiques liées à la liaison pantographe-caténaire, c'est à dire le contact entre le train et les fils conducteurs l'alimentant, sont aujourd'hui encore nombreuses.

Ainsi on constate une usure prématurée du fil et de la bande de captage liée à l'échauffement au point de contact. La caractérisation du vieillissement des matériaux d'une liaison pantographe-caténaire, l'anticipation des travaux de maintenance ou la prévention de casse sont difficiles à prendre en compte. Afin d'éviter tout risque de casse une maintenance accrue doit être mise en place.

Un outil de simulation permettant de prédire la distribution de température dans une bande de captage a été récemment élaboré.

Pour alimenter celui-ci, de nombreux paramètres d'entrée sont encore nécessaires. Étant électrifié, imparfait et glissant, ceux relatifs au contact sont difficiles à évaluer et à considérer. Il s'agit essentiellement des résistances de contact électrique et thermique, du coefficient de partage de flux thermique, du glissement magnétique, du coefficient de frottement.

Pour répondre à ces besoins, un banc d'essais reproduisant un contact entre un pantographe et une caténaire est réalisé. Pour cela, un courant électrique important (50-150 A) passe dans un échantillon de bande de captage en contact avec un disque de cuivre en rotation. Le banc d'essais est ainsi conçu pour être représentatif d'une liaison pantographe-caténaire réelle mais aussi modulable et flexible en termes de densité de courant au niveau de la liaison, de type de matériaux au contact ou d'effort appliqué entre les deux structures.

Dans cet article, la configuration d'une liaison pantographe caténaire est expliquée. Les facteurs influençant l'échauffement et l'usure de la bande de captage sont énumérés. L'ensemble du banc d'essai est ensuite décrit et sa représentativité critiquée. Les outils et techniques de pilotages, d'instrumentations et de mesures (résistivité thermique et électrique, coefficient de frottement) sont explicités. Enfin, Les perspectives à court et moyen termes sont abordées suivies d'une conclusion et de perspectives à court et moyen termes.

Transfert de chaleur par convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires horizontales

Elhadj Boubacar Barry¹, Changwoo Kang², Harunori Yoshikawa³, Innocent Mutabazi^{1,*}

* ✉ : innocent.mutabazi@univ-lehavre.fr

¹ Université Le Havre Normandie

² Université Nationale de Jeonbuk

³ Institut de Physique de Nice - UMR 7010

Mots clés : Cavité rectangulaire ; Convection thermoélectrique ; Fluide diélectrique ; Force diélectrophorétique.

Résumé :

La maîtrise des échanges thermiques dans les systèmes de refroidissement des équipements industriels (Aérospatial, Aéronautique ou Microfluidique) est un défi technologique majeur. La convection naturelle, l'un des modes de transfert de chaleur qui ne requiert aucun mécanisme externe (ventilateur ou pompe), est un moyen efficace et moins coûteux. Ce phénomène se déclenche dans un fluide lorsque la différence de température ΔT atteint une valeur critique ΔT_c , qui dépend du coefficient de dilatation thermique, de la diffusivité thermique et de la viscosité du fluide. En dessous de cette valeur ou dans des conditions de microgravité, il est impossible d'évacuer la chaleur par convection. L'application d'un champ électrique alternatif E à la couche du fluide induit une force de poussée électrique proportionnelle au carré de l'intensité du champ électrique. Cette force est semblable à la poussée d'Archimède (avec une gravité effective d'origine électrique) et peut induire un transfert de chaleur par convection. La compréhension des mécanismes générant la convection grâce au champ électrique dans un fluide revêt un intérêt crucial pour le contrôle thermique. Dans cette étude, nous avons réalisé une analyse linéaire pour déterminer les valeurs critiques du champ électrique marquant le début de la convection dans le fluide ; ensuite une étude faiblement non linéaire autour du seuil nous a permis de caractériser les différentes structures générées par le couplage thermoélectrique et ainsi quantifier le transfert de chaleur.

La stabilité d'une couche horizontale de fluide d'épaisseur d , de masse volumique ρ , de viscosité ν , de diffusivité thermique κ et de permittivité ε , soumise à une différence de température ΔT et à un champ électrique d'intensité E est régie par la compétition entre les effets stabilisants (dissipation visqueuse et diffusion thermique) et les effets déstabilisants (la poussée d'Archimède et la poussée électrique). Pour mettre en évidence les effets de la poussée électrique, la quantité ΔT est choisie telle que sa valeur soit inférieure à l'écart de température seuil ΔT_c de la convection de Rayleigh-Bénard. Le système admet donc un état de base caractérisé par un régime de conduction pure en l'absence du champ électrique. Lorsque la valeur du champ électrique atteint une valeur critique E_c , la poussée électrique déstabilise l'état de base indépendamment de la nature du fluide. Le seuil de l'instabilité dépend du gradient de température ΔT mais il est indépendant de la nature du fluide i.e. du nombre de Prandtl $Pr = \nu/\kappa$. Les modes critiques se manifestent sous forme de rouleaux de convection droits stationnaires d'axe horizontal. Au-delà du seuil critique, en augmentant l'intensité du champ électrique E , l'évolution des rouleaux de convection, initialement droits, se complexifie. Les rouleaux de convection deviennent modulés, ensuite oscillants avec des défauts de type dislocations, similaires à celles obtenues dans la convection de Rayleigh-Bénard. Le coefficient de transfert de chaleur augmente avec la valeur du champ électrique : ce qui prouve que la force DEP est un moyen alternatif d'évacuation de chaleur pour certains systèmes de refroidissement.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-031>

Caractérisation thermique du biofouling autour d'un câble électrique dynamique sous-marin

Ziad Maksassi^{1,*}, Bertrand Garnier², Ahmed Ould El Moctar³, Franck Schoefs⁴

* ✉ : Ziad.Maksassi@univ-nantes.fr

¹ Université de Nantes, Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, LTeN, UMR CNRS 6607 et Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR CNRS 6183

² CNRS, Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, LTeN, UMR 6607

³ Université de Nantes, Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, LTeN, UMR CNRS 6607

⁴ Université de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR CNRS 6183

Mots clés : Energie Marine Renouvelable (EMR), câble électrique dynamique, biofouling, analyse thermique, caractérisation thermique de biofouling

Résumé :

Dans le monde entier, les projets d'éoliennes flottantes, à l'échelle du prototype, de la ferme pilote ou de la ferme commerciale sont en cours de développement. Un de leurs composants clés est le câble dynamique qui permet la connexion électrique. Le système d'isolation électrique (polyéthylène réticulé) du câble dynamique haute tension sous-marin est conçu pour supporter une température maximale de 90 °C. Cependant, la croissance de biofouling, en particulier les moules, peut modifier le transfert de chaleur autour du câble, ce qui pourrait entraîner une diminution ou une augmentation de la température du câble. Dans ce travail, la conductivité thermique effective des différents types de moules (juvéniles, mixtes (juvéniles et adultes) et adultes) est mesurée, ainsi que le coefficient d'échange autour des moules. La conductivité thermique effective des moules est estimée à l'aide du modèle stationnaire analytique 1D (loi de Fourier) valable pour une distribution uniforme des moules autour du tube. La méthode de mesure est validée en mesurant également la conductivité thermique d'une mousse adhésive double face et par comparaison avec une mesure à partir d'un dispositif à plaque chauffante. De plus, le coefficient de transfert de chaleur de l'eau autour des moules est également calculé en utilisant (loi de Newton). En outre, il est comparé à deux corrélations de la littérature (Churchill & Chu et Morgan). De plus, on a également considéré des distributions non uniformes des moules autour du tube en effet en pratique la croissance des moules se produit sous la mer principalement sur le dessus du câble électrique horizontal puisque la lumière vient d'en haut. Dans ce cas, en raison d'une géométrie plus compliquée, la croissance de la conductivité thermique effective de différents types de moules et le coefficient de transfert de chaleur de l'eau autour des moules sont estimés à l'aide de la méthode numérique (éléments finis via COMSOL) pour résoudre l'équation de transfert de chaleur 2D et d'une technique d'estimation des paramètres (méthode simplex) pour obtenir la conductivité thermique effective de moules. Nous obtenons que les moules juvéniles ont la plus petite conductivité thermique effective par rapport au mélange (juvénile et adulte) et aux moules adultes respectivement. En fait, une petite circulation d'eau entre les moules est attendue dans l'espace poreux, ce qui conduit à une augmentation de la conductivité thermique effective (cette hypothèse est confirmée en mesurant la conductivité thermique d'un matériau poreux constitué d'un amas de billes de verre). Par conséquent, comme les moules juvéniles ont la plus faible porosité de l'eau par rapport aux moules mixtes et adultes, elles ont donc la plus petite conductivité thermique effective. Ainsi, cette caractérisation thermique est une étude très intéressante, car elle permet à l'avenir de créer un modèle numérique pour vérifier si la température du conducteur dépasse sa température maximale (90 °C) pour un fonctionnement continu ou non, en d'autres termes, on peut vérifier l'effet thermique de différents types de moules avec des épaisseurs différentes sur l'endommagement des câbles électriques dynamiques.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-038>

Utilisation de fonctions objectives locales dans le cadre de l'optimisation topologique des échanges thermiques d'un canal vertical asymétriquement chauffé

David Marti^{1,*}, Alain Bastide¹, Delphine Ramalingom¹, Pierre-Henri Cocquet¹

* ✉ : david.marti@univ-reunion.fr

¹ Université de la Réunion, laboratoire PIMENT

Mots clés : optimisation topologique mécanique des fluides convection naturelle

Résumé :

L'économie d'énergie est un enjeu majeur des bâtiments en milieu tropical où les températures extérieures élevées imposent encore trop souvent d'utiliser des systèmes énergivores permettant d'assurer le confort des occupants d'un bâtiment.

Les présents travaux concernent les échangeurs de chaleurs passifs fonctionnant à partir du principe de siphon thermique et de ventilation naturelle. Le mur trombe est une application de génie climatique concrète de ce principe.

L'objectif est d'optimiser la forme d'un canal vertical chauffé asymétriquement dans lequel l'air s'écoule afin qu'il réponde au mieux à certains objectifs physiques tel que favoriser les échanges de chaleurs entre l'entrée et la sortie du canal. Ce problème physique est celui du mur trombe. On utilise pour cela une méthode d'optimisation topologique adjointe où l'on pénalise les équations de Navier-Stokes par un terme dit de Brinkman issue de la théorie des milieux poreux, tel que proposé par Othmer et al.

Ces travaux s'inscrivent dans la poursuite des travaux réalisés par Ramalingom et al. L'originalité apportée ici consiste à définir et à utiliser des fonctionnelles locales définies dans l'ensemble du domaine fluide. Une revue de la littérature a montré que cette approche n'a pas encore été proposée et que seuls des fonctionnelles globales sont utilisées à ce jour. Ces fonctionnelles locales permettent de venir renforcer ou atténuer localement les effets des fonctionnelles globales. Ce sont donc de nouveaux outils à la disposition du concepteur permettant d'optimiser un domaine en tenant compte de critères locaux.

L'objectif de la communication est de présenter les avantages et les perspectives d'avoir recours aux fonctionnelles locales en optimisation topologique. Les fonctionnelles globales « classiques » (définies comme la différence de quantités entre l'entrée et la sortie de l'échangeur) telles que la minimisation des pertes de charges du fluide et la maximisation des transferts de chaleurs sont reformulées en fonctionnelles locales (quantités calculées en chaque point du domaine). Les sorties du modèle sont la forme optimisée du domaine, les champs de température, et les champs de vitesse dans le domaine.

Optimisation de la caractérisation thermique de l'argent fritté par la méthode flash

Anas Sghuri¹, Yann Billaud^{1,*}, Loïc Signor¹, Pascal Gadaud¹, Didier Saury¹, Xavier Milhet¹

* ✉ : yann.billaud@ensma.fr

¹ Institut Pprime UPR CNRS 3346 - CNRS / ENSMA / Univ. Poitiers

Mots clés : Argent fritté, conduction thermique, estimation de paramètres, méthode flash, méthodes inverses.

Résumé :

Ce travail présente une optimisation de la caractérisation thermique par la méthode flash de l'argent fritté, utilisé notamment pour le report de composants électroniques. L'étude s'appuie sur une évaluation comparative de la durée et du niveau d'intensité d'excitation du laser, par rapport à la face de mesure, et de leurs effets sur la précision de l'estimation des diffusivités thermiques du matériau. La méthode d'estimation des diffusivités repose sur la résolution d'un problème inverse en minimisant l'écart quadratique entre la réponse d'un modèle semi-analytique 3D et les mesures issues d'une unique expérience de type méthode flash. Pour cette étude préliminaire, des données synthétiques représentatives seront utilisées. L'estimateur retenu, connu sous le nom de ENH (Estimation par Normalisation des Harmoniques), consiste à diviser les mesures par une harmonique de référence de manière à transformer le problème inverse non-linéaire en un problème inverse linéaire par rapport aux paramètres à estimer. Cette méthode permet l'estimation simultanée des composantes de la diffusivité dans le plan de l'excitation (α_x et α_y) ainsi que les paramètres associés à l'excitation non uniforme. La précision de la méthode est évaluée à partir de données synthétiques, et les résultats de l'identification correspondants aux configurations étudiées, en termes de face de mesure et d'excitation, sont présentés et commentés.

Analyse des transferts thermiques au sein d'un écoulement de convection naturelle dans un espace confiné comportant un obstacle partiellement chauffé.

Alexandre Weppe^{1,*}, Florian Moreau¹, Didier Saury¹

* ✉ : alexandre.weppe@ensma.fr

¹ Institut Pprime, UPR 3346 CNRS – ENSMA – Université de Poitiers, BP 40109, F-86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

Mots clés : convection naturelle, étude expérimentale, transfert de chaleur

Résumé :

Les écoulements soumis à des effets de flottabilité prépondérants sont observés dans de nombreuses applications industrielles, et en particulier dans les secteurs du nucléaire et de l'automobile. On peut citer la problématique du refroidissement d'un compartiment moteur qui est un point essentiel dans le dimensionnement d'un véhicule. Par exemple, 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, 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 pour obtenir des temps de calculs adaptés à un contexte industriel ne rendent pas compte avec précision suffisante des interactions entre la turbulence et les effets de flottabilité et par conséquent les transferts sont mal quantifiés.

Une configuration de référence est définie, permettant d'étudier un écoulement 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 autre bloc cubique partiellement chauffé sur l'une de ses faces.

Pour cette étude, un écoulement caractérisé par un nombre de Rayleigh basé sur la hauteur du bloc chauffant $Ra_H = 1,33(\pm 0,06) \cdot 10^9$ est étudié. Pour obtenir cet écoulement, l'obstacle cubique de dimension $H \times H \times H = L_{obstacle}^3 = (0,8m)^3$ est placé au centre d'une cavité cubique de dimensions supérieures $L \times L \times L = (1m)^3$. Cet obstacle est exclusivement chauffé sur l'une de ses faces latérales verticales à une température T_c tandis que deux parois verticales de la grande cavité le contenant sont maintenues à une température T_f de sorte que l'on obtienne une différence de température $\Delta T = T_c - T_f (= 32,5^\circ C)$. Il s'agit de la paroi de la grande cavité en vis-à-vis de la face à T_c et de la paroi opposée à cette dernière. Les autres parois verticales ainsi que les deux parois horizontales haute et basse de la grande cavité sont adiabatiques.

Dans ce travail, des profils de température obtenus par micro-thermocouple dans le plan médian de la cavité ainsi que des flux thermiques en paroi sont présentés et analysés.

Propagation de fumées en façade avec contamination d'un local supérieur

Lilian Serre^{1,*}, Alain Bastide¹, Olivier Vauquelin², Karim Khan Juhoor³, Kévin Varrall²

* ✉ : lilian.serre@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire PIMENT

² IUSTI

³ Efuzif

Mots clés : Propagation de fumées, sécurité incendie, ventilation naturelle, façades, contamination

Résumé :

Les constructions dites « bioclimatiques » sont en plein essor en milieu tropical, comme sur l'île de La Réunion. L'importante porosité aéraulique des façades de ces constructions permet de rafraîchir l'ambiance des bâtiments par la ventilation naturelle. Cependant, cette utilisation de la ventilation naturelle à des fins de confort thermique peut nuire aux objectifs de sécurité incendie.

L'écoulement interne d'une cellule où se développent les fumées d'un incendie dépend de la puissance de la source et de la géométrie du local (et en particulier la position des ouvrants). Ainsi, selon les conditions, l'ambiance peut être stratifiée ou mélangée, et les écoulements fluides aux ouvrants sont unidirectionnels (entrant ou sortant) ou bidirectionnels.

Le présent travail a pour objectif d'étendre ces études et de comprendre dans quelles mesures le panache de fumée issu de ce local dit « source » peut, par propagation en façade [4-5], contaminer un local qui lui est superposé.

Une étude numérique, réalisée sur le logiciel de MFN Fire Dynamics Simulator, permet d'aborder la dynamique de cette contamination. Dans une configuration académique, dans laquelle les locaux sont de mêmes dimensions et ouverts sur une face commune, le panache déversant est défini par ses conditions de température et vitesse d'injection imposées à la source ($U_i = 0.5, 1, 1.5$ et 2 m/s, et $T_i = 80, 100, 200$ et 300°C). Le transport d'un polluant passif (ici le monoxyde de carbone) permet une quantification de la contamination du local supérieur.

Pour une température d'injection fixée, le taux de contamination décroît systématiquement avec l'augmentation de la vitesse d'injection. A contrario, l'augmentation de la température n'engendre que des variations peu significatives du taux de contamination pour de faibles vitesses d'injection, mais a un impact important pour les vitesses d'injection élevées.

L'aérodynamisme joue un rôle important dans cette contamination, la modélisation en Froude permettant classiquement de traiter la dynamique de panache n'est plus suffisante pour retranscrire la physique rencontrée ici.

Etude du transfert radiatif dans les matériaux composites semi-transparents

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

* ✉ : florent.retailleau@isl.eu

¹ Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis

² Institut de Thermique, Mécanique et Matériaux (IThEMM)

Mots clés : laser, matériaux composites, fibres, diffusion

Résumé :

Les matériaux composites sont aujourd'hui incontournables dans de nombreux domaines en raison de leurs caractéristiques techniques (légèreté, solidité, rigidité) et de la réduction des coûts de production. Ces matériaux ont permis l'émergence des drones civils et militaires qui représentent une nouvelle menace. L'utilisation de la technologie laser permet d'appliquer des contraintes thermiques au niveau de certaines zones afin d'engendrer des dégradations thermomécaniques critiques pour le système en vol. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre la propagation d'un flux lumineux au sein d'un matériau composite semi-transparent diffusant en fonction de la température.

Ces dernières années, de nombreuses études ont porté sur les transferts radiatifs en milieux semi-transparents diffusants. L'équation de transfert radiatif (ETR) est conventionnellement utilisée pour modéliser la propagation du rayonnement. Dans la plupart de ces travaux, les frontières des matériaux sont traitées comme transparentes ou lisses. Une des difficultés sur l'étude du transfert radiatif au sein des milieux composites concerne la présence des frontières rugueuses provenant du procédé d'élaboration. Ces frontières rugueuses sont difficiles à appréhender du point de vue théorique et leurs présences affectent les mesures.

Une meilleure connaissance des propriétés radiatives volumétriques (coefficient d'absorption, coefficient de diffusion et fonction de phase) et surfaciques (réflectivités et transmittivités aux interfaces) est indispensable. L'approche expérimentale permet de retrouver ces propriétés radiatives grâce à un dispositif de mesure adapté et à la maîtrise de la température de l'échantillon.

Le présent travail fait suite aux travaux présentés en 2019. Il se focalise sur l'identification simultanée par méthode de Gauss-Newton des propriétés radiatives volumétriques et surfaciques de matériaux composites de la température ambiante jusqu'à la température de début de dégradation. Le modèle direct de résolution de l'ETR utilise la méthode de Monte Carlo et est basé sur six inconnus : trois propriétés volumétriques et trois propriétés de diffusion surfacique. La fonction de phase est modélisée par la fonction de Henyey-Greenstein. Cette étude montre que les propriétés identifiées permettent de reproduire les lobes de réflectance et de transmittance bidirectionnelles d'un matériau semi-transparent rugueux à différentes températures.

Mesures des propriétés thermiques des bétons à base de copeaux de bois

Youssoufou Mahaman Laouali Souley^{1,*}, Céline Perlot-Bascoules², Jean Castaing-Lasvignottes¹, Benjamine Youssouf¹, Laetitia Adelard¹

* ✉ : youssoufou.mahaman-laouali-souley@univ-reunion.fr

¹ PIMENT

² SIAME

Mots clés : Béton biosourcé, copeaux de bois, conductivité thermique, granulats végétaux

Résumé :

Le secteur du BTP est l'un des secteurs les plus importants d'un point de vue empreinte écologique (consommation de matières premières et d'énergie, production de gaz à effet de serre), notamment du fait de l'utilisation du béton. Le béton est un mélange entre un liant, de l'eau et des granulats plus des adjuvants. Les activités liées au bâtiment et aux travaux publics constituent l'une des plus grosses sources de consommation de granulats. Ces dernières années, ce secteur connaît une évolution croissante à La Réunion. De plus, les fabricants de ciment locaux utilisent de la pouzzolane réunionnaise qui est un constituant important du mélange pour la fabrication du ciment. Afin de s'inscrire dans une démarche de développement durable et d'efficacité énergétique, des alternatives dans le processus de fabrication du béton doivent être trouvées.

La substitution des granulats naturels par des coproduits ou sous-produits agricoles ou industriels locaux est une solution envisageable. Afin de définir dans quelles mesures l'utilisation de granulats végétaux dans le béton permettrait de limiter l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. Dans ce cadre, nous procédons à plusieurs études. Ces dernières concernent notamment la caractérisation thermique, hydrique et mécanique du béton biosourcé dans le but d'obtenir un meilleur confort thermique dans les bâtiments, tout en assurant une résistance mécanique acceptable d'un point de vue constructif. Plusieurs facteurs influent sur le comportement thermique des bétons composites, particulièrement la taille des fibres, le rapport massique eau/liant, les procédés de mise en forme, le malaxage, et surtout la nature du liant. Par conséquent, nous effectuons plusieurs tests sur des mélanges entre différentes tailles de copeaux et un liant reformulé (ciment plus chaux) dans le but de les caractériser.

Dans cet article, nous présentons principalement les mesures de conductivité thermique (par la méthode fluxmétrique) du béton à base de copeaux de bois. Nous avons testé plusieurs échantillons contenant un taux de granulats biosourcés variable (de 0 % à 20 %). Les premiers résultats ainsi qu'une analyse comparative au béton traditionnel montrent des valeurs encourageantes.

Convection thermoélectrique dans des cavités rectangulaires

Elhadj Boubacar Barry¹, Changwoo Kang², Harunori Yoshikawa³, Innocent Mutabazi^{1,*}

* ✉ : innocent.mutabazi@univ-lehavre.fr

¹ Université Le Havre Normandie, LOMC UMR CNRS 6294

² Jeonbuk National University

³ Institut de Physique de Nice - UMR 7010

Mots clés : Cavité rectangulaire ; Convection thermoélectrique ; Fluide diélectrique ; Gravité électrique.

Résumé :

La convection est un mode de transfert de chaleur qui fait intervenir le mouvement macroscopique d'un fluide. On retrouve ce phénomène de transfert thermique dans certains appareils de la vie quotidienne tels que les radiateurs ou les circuits de refroidissement des ordinateurs ou systèmes industriels. La convection thermique est l'une des méthodes de transfert de chaleur les plus efficaces, plus économiques et très simples à mettre en œuvre. Cependant, son utilisation devient impossible lorsque l'on réduit considérablement la taille des appareils ou en l'absence de gravité terrestre. En effet, la miniaturisation des appareils permet la mise au point de composants électroniques ou électromécaniques de tailles millimétriques et submillimétriques. À ces échelles, les techniques ordinaires de refroidissement sont obsolètes en raison de la réduction de la quasi-totalité des surfaces de contacts et de l'impossibilité d'installer des ventilateurs. Cependant, ces dispositifs sont capables de supporter des champs électriques élevés sans nuire à leur fonctionnement. L'application d'un champ électrique alternatif de haute fréquence à un fluide diélectrique inhomogène est donc une méthode alternative permettant de générer la convection thermoélectrique ; et elle représente un bon candidat pour la maîtrise des échanges thermiques dans les systèmes miniaturisés dans des conditions terrestres et en micropesanteur. La présente étude est motivée par l'utilisation de la poussée électrique pour contrôler la convection thermique dans des cavités rectangulaires horizontales ou verticales qui peuvent être implémentées dans des systèmes de refroidissement des dispositifs électroniques en aéronautique, aérospatiale ou en microfluidique.

Lorsqu'on applique un champ électrique alternatif de haute fréquence à un liquide diélectrique différentiellement chauffé, la différence de polarisation dans le fluide et le couplage thermoélectrique créent une force de poussée électrique avec une gravité électrique effective. Cette gravité électrique, qui représente le gradient de l'énergie potentielle par unité de masse, emmagasinée dans le condensateur que représente la cavité, est proportionnelle au carré de la tension effective. La poussée électrique a des effets similaires à la poussée d'Archimède dans la génération de la convection thermique. Nous réalisons actuellement des études numériques de la convection thermoélectrique dans une huile de silicone. Par une analyse de stabilité linéaire, le système d'équations linéarisées est résolu avec un code interne utilisant un schéma de discrétisation et la méthode de collocation spectrale de Tchebychev pour déterminer les seuils critiques de stabilité marquant le début de la convection dans le fluide. Certains résultats obtenus viennent d'être publiés dans la revue « Microgravity Science and Technology, 33, 16(2021).

Le travail en cours consiste à caractériser les régimes de convection au-delà du seuil critique. Les équations sont résolues par un code de simulations numériques directes développé au Laboratoire pour déterminer les champs de vitesses, de vorticité et de température dans l'écoulement du fluide diélectrique et le coefficient de transfert thermique adimensionné (nombre de Nusselt) en fonction de l'intensité du champ électrique appliqué. Parallèlement, nous rédigeons actuellement un article sur les résultats obtenus et le manuscrit de thèse qui devra être soutenue avant décembre 2021.

Work In Progress

Thème 3

Modélisation et simulation numérique

Modélisation et intégration temporelle d'un problème thermique couplé par la méthode de Monte Carlo	36
Modélisation analytique d'un stockage thermocline pour la récupération de chaleur fatale ou pour centrale solaire à concentration	37
Vers un modèle thermo-optique des LEDs utilisées dans les systèmes d'éclairage automobile	38
Influence des échanges radiatifs/convectifs sur l'étalement d'une goutte de verre	39
Simulation d'un four de recuit par modèle réduit modal	40
Caractérisation thermique des fils et bobines isolés pour les machines électriques à haute température	41
La réfrigération magnétocalorique au défi du réchauffement climatique	42
Influence of tracer injection location on mixing in a curved pipe	43
Thermodynamique des chocs d'une membrane pressurisée : le cas des ballons de sport.	44
The design of new electrochemical cells for studying highly active metalloenzymes	45
Optimisation Dynamique Temps-Réel d'une centrale solaire thermique	46
Study of permanent and alternate gas flow in microchannels	47
Influence du pas hélicoïdal sur les performances thermo-hydrauliques d'un tube annulaire à parois macro-déformées	48

Modélisation et intégration temporelle d'un problème thermique couplé par la méthode de Monte Carlo

Thomas Villemin^{1,*}, Olivier Farges², Gilles Parent², Rémy Claverie³, Julien Bouyer⁴

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

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France ; Cerema Est, Équipe de Recherche TEAM, 71 rue de la grande haie – 54510 Tomblaine, France

² Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

³ Cerema, Équipe Recherche TEAM, 71 rue de la grande haie, 54510 Tomblaine, France

⁴ Cerema Est, Équipe de Recherche TEAM, 71 rue de la grande haie – 54510 Tomblaine, France

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

Résumé :

La fonction des panneaux photovoltaïques est de convertir l'énergie solaire reçue sous forme de rayonnement en énergie électrique. Cependant, une part importante de l'énergie incidente est aussi transformée en chaleur conduisant à une élévation rapide de la température du panneau, supérieure à 70°C en surface, ce qui a pour conséquence une baisse significative du rendement. Afin d'évaluer correctement ce rendement, une modélisation thermique est nécessaire car il dépend directement de la température des cellules photovoltaïques, grandeur soumise à la variation temporelle des paramètres climatiques dans l'environnement du panneau. De nombreux modèles ont été développés en se basant sur des hypothèses ne prenant pas en compte – ou très peu – les conditions environnementales locales (e.g. variables climatiques, masques solaires) ou l'ensemble des phénomènes physiques (e.g. bilan d'énergie de surface).

Ce travail porte spécifiquement sur la modélisation thermique d'un milieu solide opaque en environnement réaliste soumis à des conditions climatiques effectives. L'aspect semi-transparent d'un panneau solaire n'est pas pris en considération dans notre étude. Le modèle développé avec la méthode de Monte Carlo couple tous les types de transferts thermiques – rayonnement, convection, conduction et flux solaire – appliqués à une géométrie simple en intégrant temporellement les paramètres climatiques. Par ailleurs, la méthode de Monte Carlo ayant déjà fait ses preuves sur sa capacité à gérer les géométries complexes, le passage à une géométrie réelle (e.g. multicouche, plusieurs matériaux) n'ajoutera pas de complexité au modèle.

La géométrie choisie est une plaque de dimensions 1 m × 1 m × 0,035 m disposée parallèlement au sol. Les simulations des températures de la plaque sont effectuées en considérant plusieurs matériaux. Les paramètres climatiques sont le rayonnement global ($W \cdot m^{-2}$), les températures d'air et de surface de sol (°C) ainsi que la vitesse du vent ($m \cdot s^{-1}$). Les données proviennent de la plateforme expérimentale du Cerema à Nancy.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence du choix des matériaux et des paramètres climatiques sur les températures simulées et valident les hypothèses initiales.

Modélisation analytique d'un stockage thermocline pour la récupération de chaleur fatale ou pour centrale solaire à concentration

Régis Olivès^{1,*}, Aubin Touzo²

* ✉ : olives@univ-perp.fr

¹ PROMES-CNRS - UPVD

² PROMES-CNRS

Mots clés : stockage thermique, thermocline, centrale solaire à concentration, chaleur fatale,

Résumé :

Dans le cadre de la transition énergétique, le stockage thermique est un élément essentiel tant pour les centrales solaires à concentration que pour la récupération de chaleurs fatales. Le stockage thermique peut être intégré au réseau d'énergie afin de contribuer à un management de l'énergie plus efficient. Il peut permettre d'assurer une fourniture d'énergie contrôlée à partir de sources intermittentes telles que l'énergie solaire ou les chaleurs à haute température issues de procédés industriels. Parmi les technologies envisagées, le stockage de type thermocline avec un fluide de transfert qui traverse un lit de particules constitue un moyen intéressant qui a fait l'objet de nombreux travaux. Néanmoins, la modélisation du stockage thermocline peut être relativement lourde du fait de la nécessité de résoudre, bien souvent, un modèle monodimensionnel à deux températures tel que le modèle de Schumann. Afin d'intégrer le stockage thermocline dans un réseau d'énergie ou dans une centrale solaire et optimiser le fonctionnement nécessairement dynamique du stockage, il est nécessaire de pouvoir résoudre de façon performante un système à deux équations couplées, l'une pour le fluide et l'autre pour le solide. Certes, selon les hypothèses, une solution analytique existe. Mais lorsqu'il devient nécessaire de prendre en compte la diffusion thermique axiale, le modèle se complique et exige de mettre en œuvre une simulation numérique qui peut s'avérer longue en vue de l'optimisation. Dans un premier temps, nous proposons une méthode de résolution basée sur la double transformée de Laplace qui permet d'obtenir cette solution. Ainsi, la transformée est appliquée simultanément sur le temps et l'espace conduisant rapidement à l'obtention de la solution analytique dans le cas du modèle de Schumann. Cette méthode est mise en œuvre pour traiter le modèle qui tient compte de la diffusion thermique axiale. Dans un second temps, ces solutions sont comparées aux approximations obtenues par la modélisation du lit de particules par un ensemble de filtres en série appliqué à la température du fluide traversant le lit. Ainsi, une épaisseur donnée de lit de particules est assimilée à un filtre caractérisé par une résistance au transfert et une capacité thermique. Il s'agit alors d'appliquer la transformée de Laplace pour obtenir un modèle simple dont le temps caractéristique est lié aux résistances thermiques et à l'inertie thermique des filtres en série. A partir de ce modèle, il est possible de mener une analyse simplifiée conduisant à déterminer le comportement du stockage soumis à une entrée de chaleur fluctuante en température et/ou en débit. L'objectif est, à terme, de proposer un modèle de stockage thermocline rapide à calculer pour pouvoir non seulement faciliter le dimensionnement mais aussi mener une optimisation en régime dynamique pour l'intégration dans un réseau multi-énergies ou dans une centrale solaire à concentration.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-018>

Vers un modèle thermo-optique des LEDs utilisées dans les systèmes d'éclairage automobile

Clément Rongier^{1,*}, Rémi Gilblas¹, Fabrice Schmidt¹, Yannick Le Maoult¹

* ✉ : clement.rongier@mines-albi.fr

¹ IMT Mines Albi Carmaux, Institut Clément Ader

Mots clés : LED haute luminance, Simulations thermo-optiques, Thermographie infrarouge, Caractérisation optique, Eclairage automobile

Résumé :

Depuis quelques années, les systèmes d'éclairage automobile sont constitués de dispositifs optoélectroniques, dans lesquels plusieurs diodes électroluminescentes (DEL) sont impliquées. Pour répondre aux nouvelles tendances du marché, les systèmes à LED sont remplacés par une seule LED haute luminance. Celle-ci émet jusqu'à dix fois plus de puissance optique que les LED classiques. L'énergie optique émise par le composant induit des densités de puissance thermique qui doivent être contrôlées thermiquement. De plus, les performances optiques et la fiabilité du composant sont directement liées à la température. Ensuite, une fois que la LED est intégrée dans son système optique, l'énergie lumineuse émise par le composant induit une concentration d'énergie à l'intérieur du système. En conséquence, le système optique s'auto-échauffe ce qui peut provoquer le début de sa défaillance. Il est donc crucial de prévoir comment l'énergie lumineuse interagit avec le système optique. Ainsi, des modèles numériques précis et robustes doivent être développés afin de prédire l'interaction lumière-matière et son couplage avec les autres modes de transfert de chaleur.

Dans cet article, l'étude vise à développer et valider un modèle thermo-optique de LED haute luminance. L'approche adoptée consiste à résoudre les différents modes de transfert de manière couplée, en prenant en compte l'interaction rayonnement-matière. Dans un premier temps, l'approche numérique utilisée pour simuler l'interaction rayonnement-matière dans le logiciel commercial FVM FloEFD™ a été confrontée à une solution analytique de référence. Une fois la validation de la méthode numérique finalisée, la caractérisation optique complète du composant a été réalisée. Pour cela, un spectroradiomètre équipé d'une sphère intégrante a été utilisé. Il permet de mesurer l'énergie lumineuse émise ainsi que le spectre d'émission des LEDs. Cette caractérisation permet d'identifier les paramètres physiques jouant un rôle clé en vue de construire le modèle d'émission des LEDs. Un tel modèle a été développé et intégré dans le logiciel commercial FVM FloEFD™. Cela permet de résoudre à la fois les transferts de chaleur conducto-convecto-radiatifs et l'interaction rayonnement-matière de manière couplée.

Pour valider un modèle aussi complexe, une approche expérimentale a été conçue, basée sur la thermographie infrarouge. Une plaque est placée entre la LED et le dispositif IR et reçoit l'éclairage émis par le composant optoélectronique. Les résultats de la simulation thermo-optique ont ensuite été comparés aux données expérimentales, en termes de champs de température et de profils de température. Le modèle de simulation est prédictif des phénomènes physiques obtenus expérimentalement. Le modèle d'émission des LED couplé aux trois modes de transfert de chaleur peut ainsi être utilisé avec une précision acceptable.

Influence des échanges radiatifs/convectifs sur l'étalement d'une goutte de verre

Maxime Cressin¹, Dominique Lochegnies¹, Hakim Naceur^{1,*}, Fabien Béchet¹, Philippe Moreau¹, Nadir Boukhari²

* ✉ : Hakim.Naceur@uphf.fr

¹ LAMIH

² SAVERGLASS

Mots clés : rayonnement verre Polyflow convection formage

Résumé :

Le verre est un matériau semi-transparent dont le comportement mécanique varie fortement en fonction de la température. Dans le cas de la mise en forme du verre, et plus particulièrement lors du formage de bouteille via le procédé soufflé-soufflé, la température du verre varie de 1100°C à de 600°C environ. Il est donc nécessaire pour simuler efficacement ces opérations de mises en forme du verre de déterminer avec précision les échanges thermiques au sein du verre. Parmi ces échanges, les effets de convection et de rayonnement influent fortement sur la température et donc sur le comportement mécanique du verre. La prise en compte du rayonnement dans la simulation numérique est complexe et implique des temps de simulations plus importants. De plus, il est nécessaire de déterminer les propriétés optiques spécifiques du verre étudié à l'aide d'essais expérimentaux. En effet, des propriétés telles que l'indice de réfraction du verre ou le coefficient d'absorption sont dépendants de la composition du verre et de sa teinte.

La simulation d'une chute de goutte de verre sur une plaque d'acier a été choisie afin d'étudier l'influence des échanges thermiques sur la géométrie et la température de la goutte de verre lors de l'étalement de cette dernière. Pour simuler ce problème, le logiciel Polyflow a été retenu en utilisant une hypothèse de modélisation 2D-axisymétrique pour simplifier le modèle et ainsi réduire le temps de calcul. Ce modèle sera alimenté à l'aide de données expérimentales fournies par Saverglass et de données bibliographiques. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées dans différentes conditions de vitesse initiale de chute de la goutte. La première étude vise à étudier l'influence du rayonnement en utilisant les modèles de rayonnement mis à disposition par Polyflow qui sont la Méthode des Ordonnées Discretées et l'approximation de Rosseland. Ensuite, il s'agit d'étudier l'influence des effets convectifs en faisant varier l'intensité des échanges convectifs. Enfin, il s'agit de comparer les données numériques à des données expérimentales réalisées par Saverglass.

Simulation d'un four de recuit par modèle réduit modal

Benjamin Gaume^{1,*}, Frédéric Joly¹, Benjamin Boissiere², Ghassan Ghazal², Olivier Quemener¹

* ✉ : b.gaume@iut.univ-evry.fr

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

² ArcelorMittal, Global Research & Development, Maizières Process Voie Romaine, BP 30320 - F-57283 Maizières-lès-Metz Cedex

Mots clés : Convection-diffusion ; Rayonnement thermique ; Réduction de modèle

Résumé :

La méthode AROMM (Amalgam Reduced Order Modal Model) est une technique de réduction modale qui permet d'obtenir rapidement l'évolution de la température en fonction du temps en tout point d'une géométrie qui peut être complexe. Cette méthode utilise la décomposition du champ de température recherché sur une base modale de taille réduite calculée préalablement et adaptée à tout type de problèmes non linéaires. L'étude présentée propose d'appliquer cette technique pour une scène thermique caractérisée par un couplage entre un problème de diffusion-convection des parties solides en mouvement (équation de la chaleur) et le rayonnement entre les différentes surfaces de la scène thermique (par la méthode de radiosité).

L'application traitée est un problème de four de recuit de bandes métalliques, pour lequel la géométrie simplifiée d'une petite partie du four fait l'objet d'une simulation numérique. Dans cette portion de four, une bande en acier est mise en mouvement par un rouleau et est chauffée par rayonnement à l'aide de quatre tubes radiants maintenus à hautes température (900°C). Un écran de protection permet de protéger le rouleau du flux radiatif. Enfin, le contact imparfait entre la bande et le rouleau est modélisé par un couplage par zone pour une prise en compte de la résistance thermique de contact. La base modale est construite à partir d'un problème de référence simplifié, l'ensemble des surfaces sont considérées comme des corps noirs et la vitesse de la bande est considérée comme fixe.

Les résultats obtenus montrent la pertinence de cette technique en présence de phénomènes couplés de conduction dans les parois, de mouvement de la bande et du rouleau, et de rayonnement entre les différentes surfaces. Les premiers résultats amènent un gain en temps de calcul de l'ordre de 50 par rapport à une technique classique utilisant les éléments finis, pour une erreur de température maximum sur la bande inférieure à 2%.

Caractérisation thermique des fils et bobines isolés pour les machines électriques à haute température

Pin Chen^{1,*}, Souad Harmand¹, Ali Riahi¹, Safouene Ouenzerfi¹, Gabriel Velu², Raphaël Romary²

* ✉ : Pin.Chen@uphf.fr

¹ Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH-UMR CNRS 8201), Université Polytechnique Hauts-de-France

² Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement, Faculté des Sciences Appliquées, Technoparc Futura, Université d'Artois

Mots clés : Isolation thermique, Technique infrarouge, Haute température

Résumé :

Les machines électriques sont de plus en plus soumises à des conditions de travail de haute température et haute tension, entre autres dans des applications type moteurs avioniques, les réacteurs nucléaires et les systèmes géothermiques. Dans ces domaines, la température nominale des bobines électriques peut augmenter jusqu'à 500 °C. Ce qui s'avère être un verrou technologique pour l'isolation diélectrique des enroulements et des bobines. Les matériaux isolants organiques communs ne peuvent pas résister très longtemps à des niveaux de température supérieur à 300 °C, avec pour conséquence un vieillissement accéléré de l'isolant et une oxydation du conducteur métallique. Ainsi les matériaux composites inorganiques sont des remplaçants potentiels pour l'isolation des enroulements de machines électriques à haute température.

Dans cette étude, deux types de fils d'isolation de matériaux inorganiques sont caractérisés : la composite céramique et le ruban en fibre inorganique à base de mica. Si l'isolation en céramique présente une bonne résistance aux températures élevées, elle possède un faible rayon de courbure augmentant la difficulté de l'enroulement de bobine conventionnel. L'autre fil isolé inorganique est un fil enroulé en ruban de mica-verre, qui peut être fabriqué pour des bobines par un procédé d'enroulement conventionnel en raison d'une plus grande flexibilité. Cependant, une grande épaisseur de ruban (environ 200 μm) est souvent nécessaire pour la stabilité mécanique ce qui créera des défis pour la miniaturisation des équipements électriques notamment pour les fils de petites sections.

Dans le présent article, les performances thermiques d'un fil de cuivre nickelé isolé en céramique et du fil cuivre nickelé enrubanné d'un ruban de mica-fibre de verre ont été étudiées avec des mesures en infrarouge. Le fil de cuivre nickelé non isolé permet d'être un élément de référence. Les deux méthodes d'isolation peuvent réduire sensiblement la température de surface. Le calcul théorique et la simulation numérique démontrent des résultats similaires avec les mesures expérimentales pour les trois fils.

Ensuite, quatre bobines enroulées par ces deux fils isolés (deux avec une imprégnation supplémentaire de ciment) ont été testées. Le but est de tester la performance de ces fils dans un cas applicatif : cas du bobinage électrique (motorette). Les résultats de la cartographie thermique révèlent que l'assemblage des fils est défavorable à la dissipation thermique et que la température de surface augmente considérablement par rapport au fil unique (non bobiné). De plus, l'imprégnation au ciment réduit considérablement la température de surface et réagit lentement au changement de puissance de chauffage, produisant un effet d'inertie. Ces résultats de l'étude fournissent des informations intéressantes sur le management thermique d'une machine électrique à haute température.

La réfrigération magnétocalorique au défi du réchauffement climatique

Thierry De Laroche Lambert^{1,*}, Yannick Bailly¹, Stefan Giurgea², Jean-Claude Roy¹, David Ramel¹, Laurent Girardot¹, Raynal Glises¹, Frédéric Dubas¹, Thierry Barriere³, Laurent Hirsinger⁴, Antony Plait², Mickaël Perrin¹, Ali Ismail¹, Alexandre Meunier⁵, Tianjiao Li⁵, Julien Eustache¹

* ✉ : thierry.laroche Lambert@femto-st.fr

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

² UTBM

³ Institut FEMTO-ST (CNRS-UMR6174), Département Mécanique Appliquée

⁴ Institut FEMTO-ST (CNRS-UMR6174), Département MN2S

⁵ NextPac

Mots clés : magnétocalorique, réfrigération, régénérateurs, efficacité, matériaux magnétocaloriques, optimisation, échangeur, transfert thermique

Résumé :

Au cours des vingt dernières années, de nombreuses recherches ont été menées dans le monde pour développer des technologies de réfrigération magnétocalorique prometteuses car plus efficaces et sans émissions de GES. Elles ont permis de bien comprendre les mécanismes de l'effet magnétocalorique (EMC) présentés par de nombreux matériaux, de fabriquer de nouveaux alliages susceptibles d'une utilisation massive pour la réfrigération et la climatisation au cours des prochaines années. Cependant, certains verrous scientifiques et techniques doivent encore être levés avant d'aboutir à des dispositifs magnétocaloriques suffisamment performants pour atteindre le stade industriel et devenir concurrentiels vis-à-vis des technologies classiques de réfrigération à compression de vapeur.

Après une synthèse des récents progrès dans l'élaboration des matériaux et la mise au point de prototypes magnétocaloriques, cet article présente les défis scientifiques propres à ces machines et leurs solutions possibles. Il décrit les travaux menés au Dpt Énergie de l'Institut FEMTO-ST pour optimiser la conception des régénérateurs magnétocaloriques au cœur de ces machines.

Un de ces axes de recherche porte sur l'intensification des échanges thermiques entre les plaques de matériaux des régénérateurs magnétocaloriques et l'écoulement alterné, à des fréquences plus élevées que celles habituellement utilisées dans les dispositifs actuels. Les calculs analytiques montrent que qu'elle se produit au-delà d'un seuil critique $Re_{\omega c}$ du nombre adimensionnel de Womersley, caractérisant l'apparition de l'effet annulaire induit dans ces écoulements.

L'utilisation de régénérateurs magnétocaloriques multicouches à matériaux étagés de températures de Curie croissantes est un autre axe de recherche dont les simulations numériques démontrent l'augmentation de l'écart de température produit aux extrémités lors des cycles actifs de réfrigération magnétique. D'autres travaux en cours (microstructuration, composites) peuvent conduire aux ruptures technologiques recherchées permettant d'atteindre l'efficacité et les baisses de coûts indispensables à la commercialisation des futures machines magnétocaloriques.

Influence of tracer injection location on mixing in a curved pipe

Zia Ullah¹, Fareed Hussain Mangi^{1,*}, Aftab Ahmed²

* ✉ : fareed.mangi@iba-suk.edu.pk

¹ Energy Systems Engineering Department, Sukkur IBA University

² Mechanical Technology Department, Indus University, Karachi

Mots clés : Mixing enhancement, Curved pipe, Numerical Simulations

Résumé :

Mixing enhancement in laminar regime is of great importance because of its usage in many industrial applications such as in food and pharmaceutical industries as well as in micro Algae production. These are the areas where the quality of product can't be altered in turbulent regime due to the high shear forces between the fluid molecules which can result in an inappropriate outcome of the process.

In this study, numerical simulations through commercial code Ansys Fluent 18.2 on 2D steady laminar flow in a 90° curved pipe are performed to evaluate effect of tracer injection location on mixing enhancement. A 90° curved geometry with a radius of curvature of 0.5 for the steady Reynolds number range from 300 to 1000 is designed in Solidworks 2016. Total length of pipe is 200mm. Geometry consist of two inlets and one outlet. The main inlet is large velocity inlet with diameter of 40mm through which hot water having temperature equal to 313K enter into elbow while the small inlet have diameter of 5mm through which cold water having temperature 293K. Fluid eject through pressure outlet of the elbow having diameter of 40mm. Boundary condition parameters i.e. velocity, pressure and temperature were set according to the changing Reynolds number.

Overall solution and simulation consist four steps i.e. geometry design, meshing, setup for problem solution, and post processing which includes results and discussions.

Interesting qualitative and quantitative results for pressure, velocity and temperature are discussed on the basis of tracer injection position to study mixing enhancement. Different vertical positions in a 90o curved pipe from upper wall to the bottom wall with an increment of 1cm, 2cm and 3cm and the effect of Reynolds number are investigated.

Many conclusions/ directions can be drawn form here but, In this study focus remained only on temperature, velocity, and pressure distribution in the curved mixing phenomenon.

Thermodynamique des chocs d'une membrane pressurisée : le cas des ballons de sport.

Loïc Tadrict^{1,*}, Baptiste Darbois-Textier², François Lanzetta³, Lounès Tadrict^{4,*}

* ✉ : loic.tadrict@univ-amu.fr

¹ ISM, Aix-Marseille Université

² FAST, Université Paris-Saclay

³ FEMTO-ST, Université de Franche Comté

⁴ IUSTI, Aix-Marseille Université

Mots clés : Thermique rapide, Capteur embarqués, Interactions fluide-solide

Résumé :

Les membranes pressurisées sont utilisées dans diverses situations impliquant l'homme (protections, sports, etc.). Dans ce contexte, la mécanique des impacts des membranes est critique car sous ou sur gonflées,

elles peuvent provoquer des blessures.

Les effets de la pression de gonflage et de la vitesse incidente sur le temps de contact sont étudiés sur une expérience modèle en considérant une membrane sphérique. Des essais expérimentaux ont été conduits sur une membrane industrielle en caoutchouc avec différents gaz de gonflage (Hélium, Argon, – mono-atomiques et Air – diatomique). Ces essais mettent en évidence une dépendance du temps de contact et du coefficient de restitution avec la pression et la vitesse d'impact. La dépendance du temps de contact avec la vitesse du choc est la marque d'un choc non-linéaire.

Pour comprendre la source de cette non-linéarité, des mesures synchronisées rapides de la pression, de la température du gaz (micro-thermocouples type K) et de l'indentation de la membrane lors du choc ont été réalisées. Ces mesures montrent que sur le temps du choc, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes, a lieu une compression-détente adiabatique en interaction forte avec la membrane. Les variations de température enregistrées montrent des variations de température de plusieurs Kelvins à chaque rebond de la membrane pressurisée.

Une modélisation par équations différentielles du choc permet de montrer que le temps de contact d'une membrane gonflée est décrit par trois nombres sans dimension, (i) la pression de gonflage adimensionnée, (ii) le nombre presso-élastique qui considère l'interaction gaz-membrane et (iii) le nombre presso-inertiel qui compare l'inertie de la membrane aux forces de pression. Ce modèle est comparé aux résultats expérimentaux et permet de quantifier la dépendance du temps de contact avec la vitesse d'impact.

Ces résultats couplés thermomécaniques rapides permettent de comprendre le comportement non-linéaire d'un ballon de sport lors d'un choc avec des préconisations de pressurisation pour éviter les blessures.

The design of new electrochemical cells for studying highly active metalloenzymes

Asmaa Hadj Ahmed^{1,*}, Jean-Vincent Daurelle², Vincent Fourmond³, Jerome Vicente²

* ✉ : asmaa.hadj-ahmed@etu.univ-amu.fr

¹ Laboratoire de Bioénergétique et Ingénierie des Protéines, UMR 7281 / Laboratoire IUSTI, UMR 7343 Aix Marseille Université/CNRS

² Laboratoire IUSTI, UMR 7343 Aix Marseille Université/CNRS, Polytech Marseille, Dpt Mécanique Energétique

³ Laboratoire de Bioénergétique et Ingénierie des Protéines, Institut de Microbiologie de la Méditerranée, UMR 7281 Aix Marseille Université/CNRS

Mots clés : electrochemical cell, computational fluid dynamics, mass transport, optimization

Résumé :

Protein film electrochemistry (PFE) is an electrochemical technique that is used for studying metalloenzymes. It consists in adsorbing a film of enzyme on a rotating disc electrode (RDE) in a configuration where the electron transfer is direct, and the enzymatic activity is monitored as an electrical current. This technique has proved extremely useful to study various aspects of the activity of different metalloenzymes. However, its application can be limited especially when it comes to highly active enzymes such as CODHs. These enzymes are so fast that the catalysis is mostly limited by the transport of the substrate (CO) towards the electrode, and not by the catalyzed chemical reaction even at the highest rotation rate of the RDE. This limitation can hide information about the catalysis in the electrochemical response.

So, to overcome this problem, in a previous study, by means of computational fluid dynamics, our team designed and built a new electrochemical cell (jet-flow cell) that provides better mass transport properties than RDE. As a result, mass transport was improved but it wasn't enough for our application. Thus, the design must be optimized.

Following this study, in order to validate the numerical model, we conducted cyclic voltammetry experiments on the newly built electrochemical cell, by using a simple redox couple [$Fe(CN_6)^3 / Fe(CN_6)^{3-}$]. The results showed an excellent agreement between the simulation and the experiments which allowed us to validate our model. Furthermore, we succeeded for the first time to use the new cell for detecting the catalytic current given by an adsorbed enzyme, the nitrite reductase. Afterwards, we implemented a systematic study for the purpose of optimizing the geometry of the new design by simulation. In this work, we show the experimental results and the optimization study that we adopted to improve the transport in the new cell.

Optimisation Dynamique Temps-Réel d'une centrale solaire thermique

Alix Untrau^{1,*}, Sylvain Serra¹, Sabine Sochard¹, Jean-Michel Reneaume¹, Galo Le Roux²

* ✉ : alix.untrau@univ-pau.fr

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

² Laboratório de Simulação e Controle de Processos, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Mots clés : Optimisation dynamique temps réel, solaire thermique, simulation

Résumé :

Les centrales solaires thermiques sont caractérisées par l'intermittence de la ressource solaire et par le caractère asynchrone de la production et de la demande en chaleur. Afin de fournir de la chaleur de manière régulière et sur une plus large plage de temps, un stockage de chaleur sensible peut être ajouté. Faire fonctionner une telle centrale solaire thermique avec une demande variable et des conditions météorologiques changeantes tout en maximisant les bénéfices financiers liés à la vente de chaleur est alors un défi.

L'optimisation dynamique temps réel permet d'adapter la stratégie de fonctionnement de la centrale aux conditions réelles, en maximisant la production de chaleur tout en minimisant la consommation électrique des pompes.

L'étude en cours vise à tester une stratégie d'optimisation dynamique temps réel sur un modèle de centrale solaire thermique. Un premier modèle de connaissance, utilisé pour simuler la centrale et résolu à l'aide du logiciel Matlab, permet de représenter le fonctionnement de la centrale. Il fait régulièrement appel à un deuxième modèle, utilisé en optimisation et résolu par le logiciel Gams, pour la détermination des trajectoires optimales des variables de contrôle. L'optimisation dynamique sur Gams correspond à la résolution d'un problème NLP obtenu par discrétisation temporelle des équations du modèle grâce à la méthode de collocation orthogonale sur éléments finis.

Les trajectoires optimales seront alors suivies par des contrôleurs locaux dans le modèle de simulation de la centrale, en la présence de perturbations pour représenter ce que subirait la centrale réelle. L'état de la centrale, c'est-à-dire les températures en différents points du système, sera mis à jour dans l'optimiseur grâce au modèle de simulation.

Le stockage fera l'objet d'un traitement particulier puisque sa dynamique, plus lente, empêche son utilisation optimale sur une durée courte (de l'ordre d'une heure à une journée) envisagée pour l'optimisation temps réel. Une optimisation dynamique offline sur plusieurs jours, basée sur des prévisions météorologiques et de charge, permettra de déterminer l'état du stockage optimal à la fin de chaque journée. L'optimisation dynamique temps réel intégrera alors le suivi de l'état du stockage planifié dans sa fonction objectif économique.

Cette contribution présentera la méthodologie envisagée ainsi que la modélisation simplifiée du système.

Study of permanent and alternate gas flow in microchannels

Jean Kovchar^{1,*}, Abdelhamid Blidia², Magali Barthès¹, François Lanzetta¹, Michel De Labachellerie¹

* ✉ : jean.kovchar@femto-st.fr

¹ FEMTO-ST

² UFR-STGI

Mots clés : Microchannel, microfabrication, gas flow, Stirling

Résumé :

Recent progress in the last decades in microfabrication technology led to a growing interest in miniaturized devices. With the dimension getting smaller, knowledge of the phenomena occurring in milli- and microchannels is required. This knowledge will allow designing properly the devices to optimize their performances. Previous works on the miniaturization of a Stirling engine were carried out in our institute. They have highlighted at these micro-scales some thermal issues, the importance of minor and major pressure losses and the difficulties to understand the alternating flows. In the literature, there are indeed very few results for alternating flows. Even in the case of permanent flows (i.e. non-alternating flow) which were more studied, literature's results show contradictions between the different authors, making the influence of relevant parameters unclear on the flows at this scale.

Thus, the objectives of the present study are to investigate permanent gas flow in microchannels (with and without wall temperature gradient). The aim is to obtain reference data that will be used, in the next step of our work, on alternate gas flows. The influence of geometrical parameters such as hydraulic diameter, length of the channel and aspect ratio (ratio of the width to the height of the channel) will be investigated, as well as the influence of the compressibility of the fluid. Moreover, in order to investigate on the minor losses in microchannels, we have considered two different channel designs : straight channels and channels with bends at 90°.

Numerical investigations of gas flows in our micro-channels have been carried out for both isothermal and non-isothermal conditions. Correlations for the friction factor are established and compared with experimental results from the literature.

In addition to this numerical part, an experimental setup is being built to allow both studies for permanent and alternate gas flows. Pressure and temperature sensors at the inlet and outlet of the micro-channels will provide global measurements, and a mass flow sensor will measure the flow rate. The microchannels are fabricated in the MIMENTO clean room facilities of the FEMTO-ST Institute. They are designed with integrated temperature and pressure sensors that will provide local measurements inside the micro-channel.

Influence du pas hélicoïdal sur les performances thermo-hydrauliques d'un tube annulaire à parois macro-déformées

Feriel Yahiat², Pascale Bouvier^{1,*}, Serge Russeil³, Christophe André⁴, Daniel Bougeard³

* ✉ : pascale.bouvier@yncrea.fr

¹ IMT Lille Douai, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, Centre for Energy and Environment, F-59000, Lille Junia, Smart Systems & Energy, F-59000, Lille

² IMT Lille Douai, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, Centre for Energy and Environment, F-59000, Lille Junia, Smart Systems & Energy, F-59000, Lille

³ IMT Lille Douai, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, Centre for Energy and Environment, F-59000, Lille

⁴ Junia, Health & Environment Department, F-59000, Lille U.Lille, CNRS, INRAE, Centrale ,UMR 8207 -UMET -Unité Matériaux et Transformations, F-59000 Lille

Mots clés : Optimisation du transfert thermique, géométrie annulaire, déformation de paroi, simulations numérique, régime laminaire

Résumé :

Dans une configuration d'écoulement annulaire, la combinaison de déformations radiales successives et alternées sur la paroi externe et hélicoïdales sur la paroi interne améliore grandement les transferts thermiques et le mélange par rapport à un tube annulaire lisse classique. Dans ce poster, nous étudions plus précisément, par voie de simulations numériques, à la fois le mélange et les performances thermiques d'une telle configuration annulaire en jouant sur le pas de l'hélicoïde au niveau de la paroi interne. Les pas choisis sont 0 ; 0,015 ; 0,03 ; 0,0432 ; 0,06 ; 0,12 et 0,24. Les simulations sont réalisées pour des écoulements laminaires, incompressibles, anisothermes et stationnaires en utilisant des conditions limites de température constante (320 K) sur les deux parois. L'eau, de caractéristiques thermophysiques constantes, entre à une température de 300 K et est caractérisée par un nombre de Reynolds de 600. Les résultats montrent que les performances thermo-hydrauliques globales vont de 1 pour le tube annulaire simple à 2 pour la géométrie optimale caractérisée par un pas de 0,015. Ces performances thermo-hydrauliques sont évaluées par un facteur de performance : le PEC (Performance Evaluation Criterion). Ce dernier permet de comparer simultanément le gain en termes de transfert thermique rapporté à l'évolution de la puissance de pompage. Le mélange, quant à lui, est caractérisé par les sections de Poincaré. Pour mettre en évidence les sections de Poincaré numériquement, environ 15 000 particules sont injectées à l'entrée de la conduite et nous observons ce qu'elles deviennent à la sortie. Le mélange est caractérisé par une distribution de particules uniforme sur toute la section de passage d'un écoulement. C'est l'advection chaotique. Une analyse fine des champs de vitesse et de température permet d'appréhender les mécanismes physiques mis en jeu et leur variation en fonction de la variation du pas. Et pour certaines géométries, nous avons mis en évidence l'advection chaotique.

Thème 4

Métrologie et techniques inverses

Métrologie à très haute température (1300-2500°C) en pyrroreflectométrie pour des applications nucléaires	50
Validation expérimentale d'un modèle cinétique de solidification d'une plaque MCP/GNE	51
Modèles réduits ARX et produit de convolution en thermique linéaire des systèmes invariants	52
Mesure transitoire et sans contact de champ de température par thermotransmittance dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge	53
Estimation par méthode inverse du flux absorbé par une plaque en fonte destinée à la cuisson solaire	54
Développement d'un fluxmètre imageur hyperspectrale sans contact par thermographie InfraRouge	55
Métrologie infrarouge haute précision pour la détermination des coefficients de transfert en condensation convective	56
Méthode de Monte-Carlo Symbolique pour la caractérisation des propriétés thermophysiques : cas de la méthode flash	57
Mesure du flux thermique à l'interface buse/polymère dans le procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu	58
Double mesure des propriétés thermiques de nanostructures optomécaniques en silicium nanocristallin	59
Évolution de la conductivité thermique d'un lit de billes de plomb en fonction du chargement mécanique : Mesures et confrontation à la littérature	60
Optimisation d'un calorimètre différentiel pour la mesure en ligne du débit de dose absorbée dans le réacteur nucléaire de recherche du MIT.	61

Métrologie à très haute température (1300-2500°C) en pyroréfectométrie pour des applications nucléaires

Benjamin Turquais^{1,*}, Jean-Louis Sans², Laurent Davoust³, Jules Delacroix¹, Christophe Journeau¹, Pascal Piluso¹, Nourdine Chikhi⁴

* ✉ : benjamin.turquais2@cea.fr

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

² Laboratoire PROMES-CNRS, 7 rue du four solaire, 66120 Font-Romeu Odeillo (France)

³ Grenoble-INP/Université Grenoble Alpes /CNRS, Laboratoire SIMaP, EPM Group, 38402 Saint Martin d'Hères, France

⁴ CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

Mots clés : Métrologie, très haute température, incertitudes, pyroréfectométrie, nucléaire

Résumé :

Afin d'améliorer la compréhension des accidents graves dans les réacteurs nucléaires et le comportement des matériaux constituant le cœur fondu (corium, acier), les propriétés thermophysiques (densité, tension de surface, viscosité) de ces matériaux doivent être déterminées à très haute température ($T > 2000$ °C). Le niveau de précision de ces propriétés thermophysiques dépend directement de la qualité de la mesure de la température.

La qualité des mesures est rendue possible par la détermination des incertitudes associées. Or l'incertitude sur la mesure de température peut être significative (jusqu'à 10%) à très haute température.

La pyrométrie est utilisée en particulier sur l'installation VITI de la plateforme accident grave PLINIUS du CEA pour estimer la température à partir du rayonnement émis par la surface ainsi que son émissivité pour chacune des longueurs d'onde de travail.

Afin de réduire les incertitudes sur la mesure de température, une technique innovante par rapport à la pyrométrie, appelée pyroréfectométrie, est utilisée pour corriger les températures monochromatiques avec les réflectivités spectrales des échantillons considérés. La détermination complète des incertitudes portant sur la mesure de températures est fonction de l'incertitude due à l'étalonnage et de l'incertitude due aux capteurs et à la chaîne de mesure, laquelle inclue la nécessaire correction des températures par les réflectivités. Dans le but de réduire l'impact de l'étalonnage sur le bilan final des incertitudes, l'étalonnage a été réalisé sur des cellules à points fixes eutectiques de qualité métrologique. Une instrumentation adaptée a également été mise en œuvre, incluant notamment le dimensionnement d'une tête optique spécifique au pyroréfectomètre. Enfin, un réglage minutieux du dispositif a permis d'utiliser les réflectivités pour corriger les températures monochromatiques et obtenir une température, proche de la température du système visé, avec une incertitude considérablement réduite.

La comparaison des incertitudes sur les températures obtenues par pyrométrie et par pyroréfectométrie montre qu'un bon étalonnage ainsi qu'une chaîne de mesure optimisée permet de réduire significativement les incertitudes de l'ordre de 10% pour les pyromètres bichromatiques à environ 1-2% pour le pyroréfectomètre sur la gamme de température allant de 1300 à 2500°C.

Validation expérimentale d'un modèle cinétique de solidification d'une plaque MCP/GNE

Mariam Jadal¹, Jérôme Soto², Didier Delaunay^{1,*}

* ✉ : didier.delaunay@univ-nantes.fr

¹ Université de Nantes, CNRS, LTeN, UMR 6607, Polytech'Nantes, BP 50609, 44306 NANTES Cedex 3

² ICAM Nantes, 35 avenue du Champ de Manoeuvres, 44470 Carquefou

Mots clés : changement de phase, stockage d'énergie, modélisation

Résumé :

Nous présentons le comportement thermique lors de son changement de phase d'un matériau composé d'une fraction massique de graphite naturel expansé (GNE) de 20

Un modèle numérique 3D sous Comsol multiphysics a été développé. Le MCP étant encapsulé dans la matrice de GNE anisotrope, les phénomènes de transferts thermiques dans la plaque sont conductifs. La fusion est classiquement modélisée par méthode enthalpique, la fusion ne présentant pas de cinétique, un pic de fusion assez étalé étant observé en DSC, indépendant de la vitesse de chauffage. Le matériau présente en solidification un comportement complexe, avec deux pics, se déplaçant en fonction de la vitesse de refroidissement. Nous avons utilisé une méthode de cinétique de cristallisation qui consiste à ajouter un terme source à l'équation de l'énergie. Au cours de la phase de solidification deux transformations exothermiques ont été mises en évidence. L'évolution de la fonction de cinétique de cristallisation de chaque transformation a été définie. La classique formulation différentielle de Nakamura a été utilisée pour décrire les cinétiques de cristallisation pour un refroidissement quelconque. Une pondération entre chaque transformation a été introduite, basée sur le rapport d'enthalpie du pic de chaque transformation par rapport à l'enthalpie totale de changement de phase.

En utilisant les conditions aux limites obtenues par des thermocouples placés sur les faces latérales de l'échantillon, les températures à cœur ont été calculées à la position de plusieurs thermocouples. La méthode montre des résultats excellents, avec un écart quadratique de l'ordre de 0.03K entre mesures et calcul, inférieur aux incertitudes de mesures.

Modèles réduits ARX et produit de convolution en thermique linéaire des systèmes invariants

Denis Maillet^{1,*}, Célien Zacharie¹, Benjamin Rémy¹

* ✉ : denis.maillet@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine

Mots clés : ARX, identification, déconvolution, inverse, régularisation

Résumé :

Lorsqu'un système matériel est soumis à de la diffusion thermique et éventuellement à de l'advection fluide, ou même à du rayonnement linéarisé, la réponse transitoire en température en un point de l'espace est un produit de convolution entre une réponse impulsionnelle et une source thermique (puissance ou température en un autre point). Ceci est vrai si trois conditions sont remplies : i) le système est régi par une équation de la chaleur et à des conditions associées qui sont Linéaires avec des coefficients Invariants en Temps (système mathématique LIT), ii) la source transitoire est unique et séparable, c'est-à-dire qu'elle peut s'écrire comme le produit d'une fonction de l'espace (son support) par une fonction du temps (son intensité) et iii) le régime préexistant, avant imposition de la source, est permanent, mais non nécessairement uniforme.

Lorsqu'on dispose des enregistrements temporels de la source et de sa réponse en un point, et que ceux-ci ne sont entachés d'aucun bruit de mesure, il est théoriquement possible de remonter à la réponse impulsionnelle correspondante, qui est alors indépendante de cette source et qui constitue la carte d'identité du système : il s'agit alors d'un problème inverse expérimental d'identification basé sur une expérience de calibration. En pratique, les mesures sont toujours plus ou moins bruitées, et le problème inverse de déconvolution est mal posé et nécessite donc une régularisation, par exemple par régularisation de Tikhonov ou par troncature de valeurs singulières, pour obtenir une réponse impulsionnelle stable, mais plus ou moins biaisée.

Une autre solution consiste à utiliser un modèle de structure AutoRegressive à entrée eXterne (ARX), qui comporte deux suites de coefficients (n_a coefficients pour la partie AR et n_b pour la partie X) dont les nombres sont ajustables. Ces deux nombres peuvent être optimisées en effectuant une estimation des coefficients AR et X pour chaque couple (n_a , n_b), et en conservant le couple et les valeurs des coefficients qui conduisent aux résidus les plus faibles sur la sortie (la réponse) par une méthode des moindres carrés linéaires. Un avantage de cette identification par modèle ARX est le fait qu'on arrive à avoir des résidus faibles, de l'ordre du bruit de mesure, avec un nombre de coefficients $n = n_a + n_b$ également très faible, et avec des valeurs qui permettent de bien prédire les sorties pour des entrées (sources) différentes, même si plusieurs couples (n_a , n_b) donnent souvent des performances très proches.

Dans la première partie de ce travail on montre le lien physique qui existe entre le modèle convolutif exact et les modèles ARX correspondants, en utilisant une paramétrisation des fonctions concernées par projection sur un peigne de Dirac. Ceci est appliqué ensuite au cas de la diffusion 1D de la chaleur dans une plaque où la source est la température face avant et la réponse une température interne.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-049>

Mesure transitoire et sans contact de champ de température par thermotransmittance dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge

Coline Bourges^{1,*}, Stéphane Chevalier¹, Alain Sommier¹, Christophe Pradère¹

* ✉ : coline.bourges@u-bordeaux.fr

¹ I2M

Mots clés : Thermotransmittance, Transitoire, Mesure sans contact, Infrarouge, Température absolue, Semi-transparent

Résumé :

La compréhension des propriétés thermiques de matériaux est un atout dans nombreux domaines, y compris en biologie pour étudier des réactions chimiques dans des milieux vivants. L'imagerie multispectrale infrarouge associée à des méthodes inverses permet la caractérisation non destructive et sans contact des phénomènes thermiques. Cependant, lorsque la géométrie du système est trop complexe, comme dans les milieux vivants, les méthodes actuelles ne suffisent plus. Il devient alors nécessaire de développer un système d'imagerie infrarouge 3D afin d'avoir accès aux champs thermiques au sein de l'échantillon à caractériser.

Afin de réaliser ces mesures 3D dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge, une étude préliminaire sur la compréhension de la thermo-dépendance de la transmission optique d'un matériau dans l'infrarouge est nécessaire. Ce phénomène est appelé thermotransmittance. Le coefficient de thermotransmittance est une propriété intrinsèque au matériau, par conséquent il ne nécessite pas de calibrer la caméra avec un corps noir pour mesurer le champ de température au sein du matériau.

Dans un premier temps, il est nécessaire de mesurer le coefficient de thermotransmittance. Pour cela, l'échantillon à caractériser est éclairé par une source monochromatique dont la longueur d'onde est comprise dans la gamme de 3 à 6 μm . Le flux transmis est collecté par une caméra infrarouge (FLIR SC7000). Le signal capté est la somme du flux transmis et de l'émission propre du matériau. Une méthode type lock-in à deux images est mise en place pour mesurer périodiquement l'émission propre (source IR incidente éteinte) puis la somme de l'émission propre et de la source incidente transmise (source IR incidente allumée). Ainsi, il devient possible de séparer les deux contributions par soustraction. Dans ce travail, seul le faisceau infrarouge transmis est étudié. Ensuite, à l'aide d'un four résistif, un flux de chaleur est imposé à l'échantillon afin de faire varier sa température. La mesure de l'absorbance en fonction de la température permet d'obtenir le coefficient de thermotransmittance pour une longueur d'onde.

Une fois cette étape de caractérisation effectuée, il est désormais possible de mesurer la température absolue en chaque point de l'échantillon.

Dans cette communication, la calibration du coefficient de thermotransmittance sera détaillée pour plusieurs matériaux. Puis, des mesures de champs de température transitoires dans plusieurs matériaux semi-transparents seront présentées afin de valider la méthode, ouvrant la voie vers l'imagerie 3D de température dans les milieux complexes.

Estimation par méthode inverse du flux absorbé par une plaque en fonte destinée à la cuisson solaire

Gabriel Guillet^{1,*}, Jonathan Gaspar¹, Thomas Fasquelle¹, Séverine Barbosa¹, Benjamin Kadoch¹, Yannick Pizzo¹, Fabrice Rigollet¹, Jean-Laurent Gardarein¹, Christophe Le Nilot¹

* ✉ : gabriel.guillet@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France

Mots clés : Techniques inverses, estimation de flux, cuiseur solaire

Résumé :

Parmi les cuiseurs solaires, les cuiseurs de type Scheffler semblent prometteurs. Ils ont en effet un foyer fixe et sont capables de fournir une puissance suffisamment importante pour avoir des applications dans la restauration, l'agro-alimentaire et l'industrie. Dans le cadre de l'étude d'un cuiseur de ce type et de son intégration dans un restaurant à haute qualité environnementale, une méthode de caractérisation des performances énergétiques du système, faisant appel à la métrologie et aux techniques inverses, est en cours de développement.

Le cuiseur solaire évoqué est constitué d'un réflecteur de Scheffler, d'un réflecteur secondaire et d'une plaque en fonte. Celle-ci joue à la fois le rôle d'absorbeur et le rôle de plaque de cuisson.

Dans un premier temps, un modèle de l'optique du système et un modèle thermique de la plaque en fonte ont été élaborés. Ce dernier décrit notamment la distribution spatiale de la température dans la plaque au cours du temps et en fonction du flux absorbé.

Dans un second temps, on s'est intéressé aux techniques de mesure permettant de vérifier expérimentalement les performances énergétiques du système. Afin de déterminer l'efficacité de sa partie optique, il était nécessaire de mesurer le rayonnement solaire direct reçu par le réflecteur de Scheffler et le flux solaire concentré reçu par la plaque. Tandis que le premier se mesure facilement, la mesure du second est complexifiée par son inhomogénéité et sa valeur élevée. Afin de pallier cette difficulté, la plaque a été assimilée à un capteur en vue d'estimer le flux.

En effet, l'application des techniques inverses au transfert thermique par conduction dans la plaque a rendu l'estimation du flux de chaleur absorbé possible. La résolution du problème inverse s'est appuyée sur le modèle thermique 3D non-linéaire de la plaque et sur les mesures de l'expérience présentée ci-dessous.

Afin de recueillir les données expérimentales nécessaires, un banc d'expérimentation a été développé. Celui-ci est constitué d'un panneau rayonnant carré faisant face à ladite plaque en fonte disposée verticalement. Le flux de rayonnement reçu, constant mais non uniforme, a d'abord été mesuré en plusieurs points à l'aide d'un fluxmètre. Ensuite, la plaque a été disposée à la place du fluxmètre. Sa face arrière, non exposée au rayonnement, a été équipée de thermocouples et a été filmée par une caméra infrarouge alors qu'elle était soumise à un échelon de rayonnement. Sa réponse thermique a été mesurée et enregistrée.

Finalement, cette méthode permet d'estimer l'intensité du flux absorbé mais également de connaître sa distribution spatiale, tout en utilisant une instrumentation relativement simple et peu intrusive.

L'article résumé ci-dessus présentera brièvement le contexte et l'objectif de l'étude puis décrira le modèle thermique de la plaque en fonte, le banc d'expérimentation, son instrumentation et les mesures obtenues. La méthode de résolution du problème inverse sera détaillée et les résultats analysés.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-059>

Développement d'un fluxmètre imageur hyperspectrale sans contact par thermographie InfraRouge

Abderezak Aouali^{1,*}, Stephane Chevalier¹, Alain Sommier¹, Jean-Christophe Batsale¹, Christophe Pradere¹

* ✉ : abderezak.aouali@u-bordeaux.fr

¹ I2M

Mots clés : Fluxmètrie hyperspectrale, thermographie infrarouge, méthodes inverses

Résumé :

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet IGAR qui vise à caractériser thermiquement et chimiquement des torches à plasma. L'enjeu principal est la mesure des champs 3D de la température et du flux sans contact en vue de l'optimisation énergétique des torches.

La connaissance du flux thermique est souvent primordiale dans certains domaines, citons à titre d'exemple le domaine de la construction, l'aéronautique, l'aérospatiale, la métrologie ..., cette connaissance du flux thermique peut : (i), permettre la réalisation de bilans thermiques, (ii), servir de données d'entrées à des modèles ou (ii), contrôler les procédés.

Dans les travaux précédents, il existe de nombreuses méthodes d'estimation des sources de chaleur en fonction de la nature du transfert thermique : conduction, convection ou rayonnement ; on s'intéressera dans cette étude uniquement aux méthodes inverses thermiques liées au transfert conductif.

Différents capteurs de flux (pour des estimations du flux ponctuel ou spatialement répartie) ont déjà été développés auparavant en se basant sur différentes méthodes (méthodes inverses analytiques, méthodes inverses numériques, méthode du gradient de température spatiale ...). Ces capteurs sont tous conçus pour l'estimation de source dans la gamme spectrale de l'infrarouge. De plus, l'estimation simultanée de la répartition spatiale ainsi que l'amplitude (densité d'énergie) de la source est rarement atteint.

Ici l'objectif est de développer un capteur de flux hyperspectrale en utilisant un film de carbone très fin et homogène appelé thermoconvertisseur hyperspectrale. Des études ont été faites auparavant sur le thermoconvertisseur et ont démontré sa capacité à absorber le rayonnement dans une très large gamme spectrale (du visible aux ondes radio) avec des proportionnalités différentes (selon la longueur d'onde). Ce capteur permettra d'estimer la répartition spatiale de la source ainsi que sa densité d'énergie. Dans cette communication, nous présenterons le montage expérimental ainsi que le modèle analytique et la méthode inverse utilisés. Ensuite, nous proposerons une méthode de calibration du thermoconvertisseur hyperspectrale afin de mettre en évidence l'aspect quantitatif du capteur, Enfin, nous présenterons des résultats obtenus par le capteur pour différentes sources (différentes gammes spectrales).

Métrologie infrarouge haute précision pour la détermination des coefficients de transfert en condensation convective

Marion Beaumale^{1,*}, Pascal Lavieille¹, Marc Miscevic¹

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

¹ LAPLACE

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

Résumé :

Les systèmes diphasiques sont envisagés comme des solutions de refroidissement pour de multiples applications. La particularité de ce type de systèmes est le couplage fort entre performances thermiques et structuration des phases liquide et vapeur au sein de l'écoulement. La prédiction des transferts de chaleur demeure encore aujourd'hui l'une des problématiques principales dans le dimensionnement des systèmes mettant en œuvre la condensation en film à faible vitesse massique. L'originalité du dispositif expérimental proposé est sa capacité à mesurer localement et simultanément l'épaisseur du film liquide et le coefficient de transfert de chaleur. Pour la mesure des épaisseurs des films de condensats un capteur confocal chromatique et des mesures interférométriques en lumière blanche ont été utilisés. Les mesures de température de paroi quant à elles ont été obtenues par thermographie infrarouge. Le saphir a été choisi comme matériau du condenseur de par sa transparence dans le domaine visible permettant la visualisation de l'écoulement, et sa haute conductivité thermique améliorant les transferts de chaleur radiaux dans le tube. La section test, placée entre deux réservoirs à pression constante, est refroidie par de l'air conditionné. Ce choix est motivé par la transparence de l'air dans le domaine des longueurs d'ondes infrarouges détectées par la caméra thermique. En raison du mode de refroidissement utilisé (i.e. convection forcée d'air) la détermination du coefficient de transfert de chaleur nécessite une extrême précision de mesure de la température de paroi difficile à atteindre par les outils habituels. Le travail réalisé porte sur la mise en place d'une technique de mesure permettant la détermination avec une haute précision (à 0.05°C) de la température de paroi d'un tube vertical en saphir par caméra infrarouge lors de la condensation convective du HFE 7000 en écoulement descendant. Le protocole développé, ainsi que sa calibration, seront présentés en détails dans la communication.

Méthode de Monte-Carlo Symbolique pour la caractérisation des propriétés thermophysiques : cas de la méthode flash

Morgan Sans^{1,*}, Léa Penazzi¹, Mouna El Hafi¹, Cyril Caliot², Olivier Farges³, Richard Fournier⁴, Stéphane Blanco⁴

* ✉ : morgan.sans@mines-albi.fr

¹ Université de Toulouse, Mines Albi, UMR 5302 - Centre RAPSODEE

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, UMR 5142 - LMAP

³ Université de Lorraine, UMR 7563 - LEMTA

⁴ Université de Toulouse, UMR 3589 - LAPLACE

Mots clés : Monte-Carlo symbolique, méthodes inverses, méthode flash, méthode numérique

Résumé :

Dans le cadre de problèmes d'inversion non-linéaires, la recherche d'optimum est réalisée itérativement et nécessite d'accéder répétitivement à la solution du modèle direct choisi. Ce constat contraint ainsi l'inverseur à mettre en place une expérience pouvant être simulée par un modèle suffisamment simple pour garantir une construction de la solution peu coûteuse en temps de calcul.

Un compromis entre le niveau de complexité du modèle (hypothèses et conditions aux limites) et de l'expérience (matériaux utilisés et métrologie) est à réaliser. Cependant, la caractérisation de milieux complexes à haute température tels que les fibres, les mousses solides ou les liquides silicatés nécessite des modèles de transferts couplés de la chaleur (milieux semi-transparents) et des outils numériques permettant d'intégrer une grande complexité géométrique (problème 3D multi-échelles).

Les développements récents de modèles probabilistes pour résoudre les transferts thermiques couplés par Monte Carlo permettent de proposer une solution intéressante à ces besoins. En effet, les algorithmes de Monte-Carlo bénéficient des outils numériques avancés de synthèse d'images pour gérer la géométrie complexe. L'estimation locale de la température est alors réalisée à partir de la construction de chemins évoluant, sans recourir à un maillage volumique, dans la géométrie complexe 3D selon les différents modes de transports impliqués. Lors de la marche, ils mesurent l'influence des sources surfaciques/volumiques et s'arrêtent lorsqu'une température connue comme la température initiale ou une condition de Dirichlet est atteinte.

Plus récemment, il a été montré que le stockage de l'information contenue dans ces chemins permet de construire une fonction liant la température sonde aux propriétés thermophysiques du modèle thermique. Il est alors possible de réaliser un unique calcul de l'algorithme de Monte-Carlo dit Symbolique qui permettra de reconstruire la solution pour n'importe quelle valeur de paramètre.

La méthode de Monte-Carlo Symbolique (MCS) permet donc de bénéficier des avantages de la méthode de Monte-Carlo (traitement de géométries complexes et multiphysiques) avec une réduction très significative des temps de calcul. Un unique calcul réalisé sur un problème thermique donné permet de stocker l'information suffisante pour réaliser rapidement l'ensemble de la procédure d'inversion.

Cependant, les études actuelles se limitent à une dépendance unique au coefficient de convection ou à la diffusivité avec conditions aux limites de Dirichlet.

Avec l'idée du développement des connaissances autour de la méthode de MCS et le passage vers la 3D multiphysique n'étant pas limitant, nous proposons de revisiter et de mettre en oeuvre cette nouvelle technique sur le cas classique et académique de la méthode flash 1D. Après un bref rappel du problème thermique, nous détaillons la méthodologie associée à la résolution par la méthode de MCS. Enfin, la diffusivité est estimée par inversion du problème et est validée par comparaison à la méthode semi-analytique des quadripôles thermiques.

Mesure du flux thermique à l'interface buse/polymère dans le procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu

Stéphane Chevalier^{1,*}, Alain Sommier¹, Marie-Marthe Groz¹, Emmanuelle Abisset¹, Jean-Christophe Batsale¹, Christophe Pradère¹

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

¹ I2M

Mots clés : Fabrication additive, méthode inverse, thermographie infrarouge,

Résumé :

Le procédé de dépôt de fil de fondu permet la fabrication de pièces en polymère par adition de matière. Ce procédé devient largement répandu dans l'industrie pour la fabrication de pièces plastiques non contraintes mécaniquement. Afin de le fiabiliser et de rendre robuste la production en série ces pièces plastiques, la modélisation est souvent employée pour prédire les propriétés thermomécaniques et/ou prévenir l'apparition d'éventuels défauts lors de la fabrication.

Dans ce contexte, la connaissance de la condition de flux à l'interface buse/polymère lors du dépôt de fil fondu est essentielle pour prédire correctement le transfert de chaleur dans la pièce en cours de fabrication, puis ses propriétés mécaniques finales. Quelques travaux ont déjà été réalisés en ce sens, mais jusqu'à présent les auteurs s'intéressaient à la température d'interface plutôt qu'à la mesure du flux thermique. Ils ont néanmoins montré que la connaissance et le contrôle de cette condition à la limite a une grande influence sur la qualité finale de la pièce.

Pour répondre à cette problématique, une imprimante 3D Delta a été instrumentée durant la fabrication d'un mur en acide polylactique (PLA) de plusieurs millimètres de haut et de 500 μm d'épaisseur. Une caméra thermique (FLIR SC7600) est utilisée pour la mesure transitoire du champ de température avec une résolution spatiale de 72 $\mu\text{m}/\text{px}$. Ces mesures sont analysées avec un modèle linéaire Eulerien du transfert thermique unidirectionnelle dans un premier temps. Les grandes vitesses de déplacements de buse (de l'ordre de 30 mm/s) permettent de faire l'hypothèse que les gradients conductifs longitudinaux sont négligeables devant le transport de chaleur dû aux déplacements de la buse. L'inversion par les moindres carrés de ce modèle à partir les champs thermiques mesurés permet de remonter à l'estimation du flux en amplitude et en forme. Les résultats obtenus sont cohérents avec la puissance thermique moyenne apportée par la buse lors de la fusion du polymère. Ils seront présentés en détail dans cette communication, et l'influence de quelques paramètres procédés (vitesse de buse, refroidissement) sur l'amplitude et la forme du flux sera étudiée.

Double mesure des propriétés thermiques de nanostructures optomécaniques en silicium nanocristallin

Jérémie Maire^{1,*}, Emigdio Chavez-Angel², Guillermo Arregui³, Martin F. Colombano³, Nestor E. Capuj⁴, Amadeu Griol⁵, Alejandro Martinez⁵, Jouni Ahopelto⁶, Daniel Navarro-Urrios⁷, Clivia Sotomayor-Torres⁸

* ✉ : jeremie.maire@u-bordeaux.fr

¹ Institut Catalan des Nanoscience et Nanotechnologies (ICN2), CSIC et BIST ; * Adresse actuelle : I2M, CNRS UMR5295, Talence

² Institut Catalan des Nanoscience et Nanotechnologies (ICN2), CSIC et BIST

³ ICN2, CSIC et BIST ; (2) Département de Physique, UAB, Barcelone

⁴ Département de physique, Université de la Laguna ; (4) Institut Universitaire des Matériaux et Nanotechnologies, U. de la Laguna

⁵ Nanophotonics Technology Center, Université Polytechnique de Valence

⁶ VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

⁷ MIND-IN2UB, Département d'ingénierie électronique et biomédicale, Faculté de physique, U. de Barcelone

⁸ ICREA, Barcelone

Mots clés : silicium nanocristallin ; phonons ; thermoréfectance ; optomécanique ;

Résumé :

Dans de nombreuses situations, les propriétés thermiques limitent ou déterminent les performances de micro- et nano-objets, comme en atteste par exemple la microélectronique aujourd'hui ou le développement de récupérateurs d'énergie aux petites échelles. Nous nous intéressons ici au cas des propriétés thermiques de nanostructures optomécaniques. Ces structures, qui présentent des résonances optiques (1500 nm) et mécaniques (GHz) colocalisées dans une cavité micrométrique, sont fortement impactées par leurs propriétés thermiques. En effet, la fréquence d'émission d'onde mécaniques cohérentes, le « laser mécanique », dépend directement de la dissipation thermique dans la structure.

Nous avons donc caractérisé les propriétés thermiques de ces structures, à savoir la constante de dissipation thermique et la conductivité thermique. Ces nanostructures optomécaniques sont constituées de nanofils perforés de trous cylindriques et possédant des ailettes et sont fabriquées de silicium nanocristallin. Dans un premier temps, nous utilisons une technique de thermoréfectance pour comparer la conductivité thermique de membranes suspendues de silicium nanocristallin de 220 nm d'épaisseur avec différentes tailles de grains. On observe une réduction de cette conductivité thermique par un facteur allant jusqu'à 8 par rapport à son équivalent cristallin pour une taille moyenne des grains de 165 nm. La même expérience est ensuite réalisée dans les nanostructures optomécaniques pour comparer l'importance de la nanostructuration par rapport à celle des grains sur la diminution de la conductivité thermique. La réduction observée reste présente mais plus faible que dans le matériau cristallin dû à la compétition entre la diffusion de surface et l'impact des joints de grains sur la diffusion des phonons.

Enfin, une nouvelle technique sans contact est introduite pour mesurer le temps de dissipation thermique et la conductivité thermique de structures possédant une résonance optique, qui pourra être adaptée à tous types de cristaux photoniques. Cette technique pompe-sonde consiste à mesurer la vitesse de refroidissement de la résonance optique grâce au changement de longueur d'onde et utilise également des simulations éléments finis pour extraire la conductivité thermique des grandeurs mesurées. On démontre l'équivalence de cette technique avec plusieurs géométries de résonances optiques et l'accord de ces mesures avec la thermoréfectance, ce qui ouvrent de nouvelles perspectives de mesure des propriétés thermiques dans des structures photoniques.

Work In Progress

Évolution de la conductivité thermique d'un lit de billes de plomb en fonction du chargement mécanique : Mesures et confrontation à la littérature

Jordan Letessier¹, Jean-Laurent Gardarein^{1,*}, Jean-Mathieu Vanson², Fabrice Rigollet¹, Christelle Duguay², Renaud Masson²

* ✉ : jean-laurent.gardarein@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille

² CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache

Mots clés : conductivité thermique équivalente, milieu granulaire, méthode inverse, propriétés thermomécaniques

Résumé :

Dans les milieux granulaires l'estimation des propriétés thermiques équivalentes est un exercice complexe qui reste largement discuté dans la littérature. Les résultats donnés par les modèles usuellement employés souffrent d'une dispersion importante liée notamment à la méconnaissance de la microstructure à l'échelle locale, à l'empilement granulaire et aux transferts de chaleur aux interfaces.

Dans ce papier, nous proposons une méthode de mesure transitoire des propriétés thermiques d'un milieu granulaire constitué d'un lit de billes de plomb de diamètre moyen 2.8 mm. Un plan chaud permet d'imposer un flux de chaleur pilotable électriquement en face avant du lit de particules. La température du milieu granulaire est mesurée aux deux extrémités du lit, ce qui permet notamment de s'affranchir de la forme temporelle exacte du flux de chaleur imposé en face avant. On modélise le lit comme un milieu homogène équivalent, et on utilise une résolution du problème par méthode inverse pour estimer les caractéristiques thermiques du milieu équivalent. Connaissant l'effusivité du porte échantillon semi-infini à l'arrière du lit, cette méthode permet d'estimer la diffusivité et l'effusivité du milieu, la conductivité thermique est déduite par la suite. La taille des surfaces d'échanges entre les particules peut varier en imposant un chargement mécanique sur une des faces du lit. De cette manière nous évaluons l'influence des contacts thermiques entre les particules. Deux approches différentes peuvent servir à évaluer cette surface d'échange entre particules. La première utilise la théorie de contact de Hertz entre sphères. Cette méthode suppose que les billes sont sphériques et que leur déformation est élastique. L'autre approche est de définir le contact par la théorie de Greenwood et Williamson. Cette méthode a pour avantage de prendre en compte l'état de surface des billes et par conséquent d'être plus réaliste.

Parmi les modèles connus de la littérature, Imura et Takegoshi définissent la conductivité équivalente d'un milieu granulaire, en modélisant les effets simultanés de trois mécanismes de transfert indépendants. Premièrement, le transfert par conduction et par rayonnement dans le gaz, puis, le transfert thermique dans le solide pour les contacts entre particules, et enfin le transfert thermique en série entre le solide et la fine couche de gaz présente autour des contacts entre particules. Dans ce papier, ce modèle est adapté en décrivant tous ces paramètres à l'aide des propriétés thermomécaniques du solide, et du gaz, en particulier en prenant en compte la rugosité des billes de plomb mesurée par ailleurs à l'aide d'un microscope confocal.

L'évolution de la conductivité thermique équivalente, calculée avec ce nouveau modèle, en fonction du chargement mécanique est comparée aux résultats obtenus avec l'expérience. Les premiers résultats donnent de meilleurs accords avec la définition du contact par la théorie de Greenwood et Williamson.

Optimisation d'un calorimètre différentiel pour la mesure en ligne du débit de dose absorbée dans le réacteur nucléaire de recherche du MIT.

Christelle Reynard-Carette^{1,*}, Adrien Volte¹, Michel Carette¹, Abdallah Lyoussi², Gordon Kohse³

* ✉ : Christelle.carette@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

² CEA/DES/IRENE/DER, Section of Experimental Physics, Safety Tests and Instrumentation, Cadarache, F-13108, Saint Paul-lez-Durance, France

³ Massachusetts Institute of Technology, Nuclear Reactor Laboratory, Cambridge, Massachusetts, USA

Mots clés : Echauffement nucléaire, Calorimétrie, Réacteur nucléaire de recherche, Instrumentation

Résumé :

Depuis fin 2009, Aix-Marseille Université et le CEA mènent des travaux de recherche sur la mesure en ligne du débit de dose absorbée pour des réacteurs nucléaires de recherche dans le cadre du laboratoire commun LIMMEX (Laboratoire d'Instrumentation et de Mesures en Milieux EXtrêmes). Le débit de dose absorbée, qui correspond à l'énergie déposée par les interactions rayonnements/matière par unité de temps et de masse, représente une grandeur clé en particulier pour le dimensionnement des expériences d'irradiation. Il peut atteindre plusieurs W/g (plusieurs kGy/s) dans de nombreux réacteurs (par exemple 20 W/g visés pour le Réacteur Jules Horowitz en cours de construction sur Cadarache). Il est aussi appelé échauffement nucléaire du fait de l'augmentation de température induite et quantifié grâce à des calorimètres à flux de chaleur. Le poster portera sur l'optimisation d'un calorimètre différentiel à éprouvettes calorimétriques compactes, nommé CALORRE, breveté en 2015 par AMU et le CEA, et validé en conditions réelles lors d'une campagne d'irradiations au sein du réacteur polonais MARIA. Cette étude d'optimisation est conduite dans le cadre du programme CALOR-I (Compact-CALORimeter Irradiations inside the MIT research reactor) financé par la fondation A*Midex en collaboration avec le CEA et le Nuclear Reactor Laboratory du MIT (2020-2023). Cette étude a pour objectif de proposer une nouvelle configuration du calorimètre CALORRE afin de mesurer pour la première fois l'échauffement nucléaire dans le MITR. Plus précisément, il s'agira de mener des expériences dans sa boucle fluide en cœur pour différentes conditions expérimentales (puissance du réacteur, température du fluide caloporteur, type et intensité de la convection dans la boucle) et de tester de nouvelles méthode de mesure avec et sans déplacement des deux éprouvettes superposées. Les optimisations ciblent l'utilisation de nouveaux matériaux et gaz, le changement du design de chaque éprouvette et de l'assemblage du calorimètre afin d'avoir un capteur avec un encombrement réduit (du même ordre que des calorimètres mono-éprouvette), une sensibilité adaptée aux faibles échauffements nucléaires (<2W/g), une réduction des températures atteintes et des non linéarités de la courbe de réponse (masse, effets du rayonnement thermique, résistance thermique de contact). Les résultats numériques de l'étude thermique paramétrique 3D sous COMSOL Multiphysics pour des conditions de laboratoire (étalonnage préalable) et des conditions d'irradiation seront présentés, discutés et comparés aux résultats expérimentaux obtenus avec des configurations précédentes de capteurs déjà testés.

Thème 5

Thermique appliquée - habitat

Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques	64
Réflexions sur l'utilisation de capteurs de densité de flux thermique sur un banc expérimental in situ	65
Conception de parois multi-couches pour véhicules utilitaires isothermes	66
Optimisation multicritère d'un échangeur de chaleur air-sol pour différents climats mondiaux	67
Analyse du confort thermique dans une cavité ventilée selon la position de l'ouverture de sortie	68
Modélisation CFD des performances thermiques d'un mur Trombe	69
Modélisation thermique de bâtiments intégrant le BIM et la méthode des graphes avec le module NetworkX de Python.	70
Méthodes de calibration et d'optimisation pour un système solaire combiné innovant	71
Influence d'un écoulement souterrain sur les performances d'un système de fondations géothermiques	72
Contribution à la modélisation numérique des phénomènes convectifs dans une enceinte chauffée.	73
Analyse d'un système de micro-cogénération biomasse	74
Etude de l'amélioration d'un panneau aérovoltaïque installé sur un bâtiment à faibles besoins énergétiques	75

Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques

Feryal Chtioui^{1,*}, Emmanuel Bozonnet¹, Patrick Salagnac¹, Anaïs Machard¹

* ✉ : feryal.chtioui1@univ-lr.fr

¹ Université de la Rochelle, LaSIE

Mots clés : Rafraîchissement passif, Bassin en toiture-terrasse, Bâtiment commercial, Indicateurs de performance, Simulation, Modèle thermique, Changement climatique

Résumé :

Suite aux changements climatiques, les bâtiments doivent s'adapter à de nouvelles contraintes. Jusqu'à présent, lorsqu'un bâtiment était dimensionné du point de vue thermique, on s'intéressait essentiellement à la problématique d'hiver (chauffage du bâtiment). Depuis quelques années, du fait de la hausse des températures et de périodes caniculaires en été, les bâtiments doivent répondre à de nouveaux enjeux qui sont d'éviter l'inconfort d'été. Pour faire face à la forte augmentation de la consommation en climatisation, il est nécessaire de développer des systèmes de rafraîchissement dits « passifs ». Ce contexte nous amène à étudier, en période estivale, une technique de rafraîchissement passif par rétention d'eau en toiture-terrasse de bâtiments commerciaux, d'en évaluer son potentiel et de la comparer à une autre solution de rafraîchissement passif par revêtement froid de type « cool-roof ».

Après une description des différents mécanismes physiques de transfert au sein d'une toiture terrasse et du modèle numérique développé, une étude paramétrique est réalisée pour la technique de rétention d'eau en prenant en compte l'épaisseur de la lame d'eau, les propriétés radiatives de la toiture, différents climats... Cette technique est basée sur les phénomènes d'évaporation, d'échanges radiatifs nocturnes et d'inertie thermique de la masse d'eau. En effet, le modèle théorique décrit le comportement thermique de la technique de rafraîchissement passif par rétention d'eau en toiture-terrasse avec l'ambiance intérieure du bâtiment et l'air extérieur en tenant compte des propriétés de l'enveloppe du bâtiment et des conditions climatiques ainsi que les paramètres de conception de dispositif.

Dans une seconde partie, la toiture « évaporative » est comparée à une toiture avec revêtement « cool » à l'aide d'indicateurs de performance clés (KPIs) pour différents climats actuels et futures (méditerranéen, océanique) et pour une période caniculaire afin d'évaluer les performances de deux solutions passives ainsi que l'impact des paramètres de conception.

Après une description des différents mécanismes de transfert au sein d'une toiture terrasse et du modèle numérique développé, une étude paramétrique est réalisée pour la technique de rétention d'eau prenant en compte l'épaisseur de la lame d'eau, les propriétés radiatives de la toiture, différents climats... Dans une seconde partie, la toiture « évaporative » est comparée à une toiture avec revêtement « cool » à l'aide d'indicateurs de performance pour différents climats actuels et futures (méditerranéen, océanique) et pour une période caniculaire.

Réflexions sur l'utilisation de capteurs de densité de flux thermique sur un banc expérimental in situ

Marina Malagoni^{1,*}, Sandra Gallego², Stéphane Ginestet², Gilles Escadeillas²

* ✉ : malagoni@insa-toulouse.fr

¹ Institut Fédéral de Goiás

² LMDC

Mots clés : monitoring in-situ ; fluxmètres ; métrologie ; étalonnage ; sensibilité.

Résumé :

Ce travail s'intéresse à des problèmes soulevés pendant la mise en place d'un banc d'essais pour monitorer in situ des façades d'un bâtiment ancien avant et après rénovation, afin d'appréhender le comportement thermo-hydrigue de ces parois. La littérature est riche en travaux décrivant les différentes méthodes d'analyse des propriétés thermo-physiques, surtout la valeur du coefficient de transmission thermique (U), et en simulations numériques décrivant le comportement de murs anciens. Cependant on constate aussi un écart entre les valeurs déterminées sur site en conditions réelles et les valeurs théoriques, souvent attribué aux modèles de transfert de chaleur et de masse et assez souvent corrigé avec des coefficients multiplicateurs (type « offset »). On observe aussi un manque d'informations sur la méthodologie de mise en place des capteurs, notamment en ce que concerne l'étalonnage, la dérive de la sensibilité avec le temps, les contraintes au niveau de la configuration des centrales d'acquisition, la forme du capteur elle-même et les longueurs de câblage électrique. L'objectif principal de ce travail est donc d'apporter une réflexion sur ces critères concernant des capteurs de densité de flux, ainsi que de présenter un nouveau type de fluxmètre perforé qui serait plus adapté pour des parois respirantes sur bâtiments anciens. Une nouvelle méthode d'étalonnage de ces capteurs est aussi présentée et comparée à celle de la norme américaine ASTM C1130-17. Une étude particulière est aussi menée en terme d'analyse systématique de l'ampleur et de l'importance relative des incertitudes sur la sensibilité des fluxmètres. Les résultats montrent que le critère sur la longueur du câblage électrique n'intervient quasiment pas sur les résultats de sensibilité des capteurs. Cependant, une dérive avec le temps du facteur d'étalonnage entre 5 et 10% pour les capteurs traditionnels et entre 40 et 80% pour les capteurs perforés a été constatée par rapport au facteur d'usine.

Conception de parois multi-couches pour véhicules utilitaires isothermes

Adrien Fuentes^{1,*}, Patrick Glouannec¹, Hervé Noël¹

* ✉ : adrien.fuentes@univ-ubs.fr

¹ Université de Bretagne Sud, IRDL, UMR CNRS 6027

Mots clés : Transfert de chaleur, parois isolante, caractérisation, expérimentation, modélisation

Résumé :

L'exploitation de véhicules électriques pour la livraison urbaine de denrées périssables est appelée à fortement se développer dans les années à venir. Ce moyen de livraison permet de réduire les émissions carbonées liées au transport de produits alimentaires réfrigérés.

Pour que ce scénario soit viable, il devient nécessaire de limiter l'usage du groupe frigorifique embarqué et de privilégier l'utilisation du stockage électrochimique (batteries) pour la motorisation du véhicule.

Dans le cadre de ces travaux, on s'intéresse à l'isolation thermique de véhicules de petits volumes, essentiellement destinés au transport urbain de produits alimentaires réfrigérés pendant une durée de quelques heures.

L'objet de cette communication est de présenter des études expérimentales et numériques destinées à la conception optimale de parois isolantes ne pénalisant pas la masse et le volume utile du véhicule. Dans ce travail, l'augmentation la capacité thermique effective de la paroi à l'aide de Matériaux à Changement de Phase (MCP) est également étudiée. Ces matériaux sous forme de plaques planes de mousse de polyuréthane (PU) contenant différents taux de MCP, ont notamment été fabriquées pour cette étude.

Cette communication s'initie avec la présentation des résultats d'une campagne de caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux employés dans ce travail, et se poursuit avec la présentation du dispositif expérimental permettant de tester une composition de paroi définie sous différentes sollicitations thermiques.

Le modèle numérique est ensuite présenté et confronté à une séquence expérimentale afin de valider la pertinence de celui-ci. Les résultats montrent une bonne adéquation entre le modèle et l'expérience, en particulier pour la prise en compte des changements d'état du MCP. Pour finir, ce modèle est utilisé dans une phase de prospection dont l'objectif est de déterminer une configuration de paroi optimale pour cette application, avec notamment la définition de l'épaisseur et de l'emplacement optimal du MCP dans cette paroi.

Optimisation multicritère d'un échangeur de chaleur air-sol pour différents climats mondiaux

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

* ✉ : arnaud.lapertot@univ-amu.fr

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

Mots clés : Echangeur de chaleur air-sol ; Optimisation ; Pompe à chaleur ; Analyse de Sensibilité ; Stockage de chaleur

Résumé :

La consommation d'énergie dans le monde augmente très rapidement et représente environ 35 % dans le secteur résidentiel. Les stratégies mondiales ont prévu de réduire la consommation d'énergie dans le bâtiment afin de lutter contre le réchauffement climatique. Pour cela, il est possible d'utiliser des échangeurs de chaleur air-sol (EAHE) basés sur des énergies renouvelables. L'EAHE est un système de chauffage, de ventilation et de climatisation qui utilise l'air extérieur pour circuler dans des tubes souterrains afin de récupérer l'énergie du sol. Cette énergie permet de préchauffer ou refroidir l'air dans le bâtiment par ventilation. De plus, l'ajout d'une ventilation à récupération de chaleur (HRV) améliore la performance du système en récupérant l'énergie de l'air vicié. Cependant, le système nécessite de l'énergie auxiliaire pour satisfaire les besoins énergétiques globaux. Ce système énergétique EAHE/HRV peut également être couplé à une pompe à chaleur (HP) et à des collecteurs photovoltaïques (PV) afin de combler les besoins de chauffage en hiver et de refroidissement en été. En outre, des capteurs solaires thermiques peuvent être couplés à système de stockage d'eau chaude pour satisfaire la demande d'eau chaude sanitaire. Dans cette étude, le système énergétique est modélisé dynamiquement sur une année complète en utilisant des modèles d'un échangeur de chaleur air-sol, d'une ventilation à récupération de chaleur, d'une pompe à chaleur, des collecteurs photovoltaïques et thermiques, et d'un stockage d'eau chaude sanitaire. Pour étudier les performances énergétiques du système, deux critères énergétiques et un critère économique sont considérés. L'objectif principal est de déterminer le dimensionnement et la régulation optimale du système en utilisant une procédure d'optimisation. Celle-ci est composée d'une analyse de sensibilité, d'une optimisation multicritère et d'une aide à la décision. Tout d'abord, l'analyse de sensibilité est réalisée avec la méthode FAST et permet de sélectionner les paramètres les plus influents. Puis, une étude d'optimisation multicritère est effectuée avec les algorithmes génétiques pour déterminer les meilleurs compromis. Ensuite, la méthode d'aide à la décision TOPSIS sélectionne le dimensionnement et la régulation optimale. Enfin, cette procédure d'optimisation est appliquée pour différents climats liés à plusieurs capitales mondiales. Les résultats montrent que la combinaison des différents composants permet d'obtenir un système énergétique rentable et performant qui satisfait les demandes de chaleur, de rafraîchissement et d'eau chaude sanitaire.

Analyse du confort thermique dans une cavité ventilée selon la position de l'ouverture de sortie

Yamina Harnane^{1,*}, Sihem Bouzid², Sonia Berkane³, Abdelhafid Brima¹

* ✉ : harnane_y@yahoo.fr

¹ Université d'Oum El Bouaghi, Algérie. Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), Biskra

² Université d'Oum El Bouaghi, Algérie. Laboratoire conception et modélisation avancée des systèmes mécaniques et thermo fluides. Oum El Bouaghi

³ Université Batna 2

Mots clés : simulation ; convection mixte ; confort thermique

Résumé :

La ventilation a une influence majeure sur le confort thermique et sur l'efficacité des installations thermiques. Ainsi, un bon système de ventilation peut fournir un environnement dont les conditions thermiques sont confortables avec une consommation d'énergie plus basse. La ventilation naturelle et mixte avec des ouvertures Entrée/Sortie choisit judicieusement est l'une des solutions qui s'avère intéressante. Dans cet article, nous présentons une étude numérique du transfert de chaleur par convection mixte dans une cavité carrée ventilée de hauteur 2,5 m et de largeur 2,5 m. L'écoulement est bidimensionnel en régime turbulent et stationnaire. Selon la disposition de l'ouverture de sortie de l'air, quatre configurations sont considérées, l'entrée étant fixe et disposée en bas de la paroi gauche. Toutes les parois sont considérées adiabatiques sauf la paroi gauche d'épaisseur l qui exposée à une densité de flux fixe donnant un nombre de Grashof égal $7 \cdot 10^{13}$. Le modèle de turbulence RNG $k-\epsilon$ est adopté, les équations gouvernantes sont résolues numériquement en utilisant le code Fluent 14.0. L'algorithme SIMPLER est choisi pour le couplage pression-vitesse sur un maillage structuré 140×150 , raffiné près des parois, plus 90 cellules dans la paroi solide gauche. Pour évaluer les performances du confort thermique pour chaque cas d'étude, nous avons analysé la dynamique de l'écoulement qui est trouvée bicellulaire et sa thermique indique un bon rafraîchissement. L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de l'emplacement de l'ouverture de sortie sur le confort thermique à l'intérieur. Afin d'optimiser la meilleure configuration offrant le confort thermique, les résultats obtenus pour l'efficacité de la ventilation sont donnés en termes de température moyenne à l'intérieur de la cavité, de distribution de température ϵ_T . Afin de prévoir numériquement les zones de confort thermique, on a calculé température effective de tirage EDT. L'indice EDT montre une grande sensibilité de la température et de la vitesse de l'air sur la zone de confort thermique. L'indice EDT supérieur à +1,1 indique une zone d'inconfort chaud et lorsque EDT est inférieur à -1,7 on parle d'une zone d'inconfort froid. Lorsque cet indice est entre -1,7 et +1,1 ces zones sont en confort thermique.

Modélisation CFD des performances thermiques d'un mur Trombe

Afef Laribi^{1,*}, Sylvie Bégot¹, Valérie Lepiller¹, Yacine Ait-Oumeziane¹, Philippe Désévaux¹

* ✉ : afef.laribi@univ-fcomte.fr

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

Mots clés : Mur Trombe, CFD, énergies renouvelables, convection naturelle, transfert thermique conjugué

Résumé :

Dans le monde et particulièrement en France, le secteur du bâtiment est un gros consommateur d'énergie. Une part importante de cette énergie est en effet utilisée pour assurer le confort hygrothermique de l'occupant. Afin de limiter la consommation d'énergie carbonée et de limiter les émissions de gaz à effet de serre, les réglementations énergétiques incitent au développement de sources d'énergies propres.

Dans ce contexte, 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 % de l'énergie consommée. L'une des techniques passives les plus performantes réside dans l'utilisation de murs Trombe.

Un mur Trombe est un système composé, de l'extérieur vers l'intérieur, d'un vitrage séparé d'une paroi stockeuse opaque par une lame d'air ventilée. Afin de favoriser les échanges thermiques convectifs, des ouïes sont installées en parties haute et basse de la paroi stockeuse. Son intégration au bâtiment vise à valoriser le rayonnement solaire en associant deux phénomènes physiques : l'effet de serre à travers un vitrage et l'inertie thermique du mur.

Cependant, cette technique, performante en saison hivernale, présente des inconvénients en été car elle engendre une surchauffe. C'est pourquoi, des modifications doivent être mises en place afin d'adapter le fonctionnement de ce système indépendamment des conditions climatiques.

Notre étude consiste à réaliser un modèle numérique afin de simuler le comportement thermique d'un mur Trombe. Le comportement du mur Trombe en régime permanent est étudié via un modèle CFD en deux dimensions prenant en compte les transferts par conduction, convection et par rayonnement ainsi que la turbulence de l'écoulement d'air.

Après une validation des simulations à partir de résultats issus de la littérature, une première étude paramétrique concernant l'influence de la largeur des ouïes et de l'épaisseur de la lame d'air est proposée. Les performances thermiques du mur Trombe sont analysées numériquement par le biais de plusieurs grandeurs (température au niveau au niveau de la lame d'air, des ouïes, de l'intérieur du local, vitesse au niveau de la lame d'air) décrivant les aspects thermo-aérauliques locaux et à travers la notion d'efficacité thermique du système.

Modélisation thermique de bâtiments intégrant le BIM et la méthode des graphes avec le module NetworkX de Python.

Mustapha Ouhimd^{1,*}, Hassan Bouia², Christian Obrecht³, Frédéric Kuznik³, Mathias Bouquere¹

* ✉ : mustapha.ouhimd@insa-lyon.fr

¹ BHEE Bâtiment Haute Efficacité Energétique, Laboratoire en commun entre EDF R&D TREE et le CETHIL.

² EDF R&D Site des Renardières, Dpt. TREE, avenue des Renardières, 77250 Ecuelles - Moret-sur-Loing cedex, France

³ CETHIL UMR5008, Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon, 9 Rue de la Physique, 69621 Villeurbanne, France

Mots clés : Modélisation en thermique des bâtiments, simulation numérique, BIM, gbXML, Networkx

Résumé :

Le secteur du bâtiment est un secteur consommateur d'énergie finale et générateur d'émissions de gaz à effet de serre, cela le met au cœur des politiques publiques de transition énergétique engagées pour réduire ces consommations énergétiques et les émissions associées. Ces politiques ont défini de nouveaux objectifs et exigences en lien avec l'efficacité énergétique en particulier. La modélisation de la thermique de bâtiment représente un des axes permettant de traiter en partie ces objectifs.

Dans ce contexte, cet article présente une méthodologie de traduction du comportement thermique des bâtiments en intégrant, d'une part, les maquettes numériques dites maquettes BIM Building Information Modeling permettant de fournir une structure de données thermophysiques bien définie, et exploitable de façon générique, et d'autre part, le module puissant networkx de python contenant les méthodes appliquées de la théorie des graphes.

Cette méthodologie consiste en la transformation de maquettes BIM sous format gbXML décrivant les propriétés géométriques et physiques des bâtiments, en un graphe. Ce graphe est constitué de sommets représentant les points d'intérêt pour le calcul des températures (volume d'air, surface de paroi, interface entre les couches de matériaux. . .). Ces sommets sont interconnectés par des arcs représentant les flux thermiques entre eux (conduction, convection, renouvellement d'air, ponts thermiques, . . .).

L'exploitation d'un tel graphe permet de construire le système linéaire d'état complet des bâtiments ($C \cdot dT/dt = A \cdot T + B \cdot U$) très facilement dans le cas d'échange radiatif grandes longueurs d'onde linéarisé. Ce système d'état linéaire obtenu est un modèle continu dans le temps. Pour le résoudre numériquement, cela nécessite le passage à un modèle discret dans l'espace et dans le temps, avec une taille qui dépend de la finesse dans la discrétisation, de la richesse physique du système, du nombre d'hypothèses, et des sollicitations thermiques traitées.

Afin de valider la méthode, un cas simple de bâtiment sera modélisé par un graphe et par un autre modèle créé à partir de la bibliothèque nommée buildSysPro qui a déjà été testée et validée. Une comparaison des résultats générés à partir de ces deux modèles permettra de valider la nouvelle méthode intégrant la méthode des graphes.

Méthodes de calibration et d'optimisation pour un système solaire combiné innovant

Mathieu Frappé^{1,*}, Alain Sempey¹, Hugo Viot², Laurent Mora¹

* ✉ : mathieu.frappe@u-bordeaux.fr

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, I2M Bordeaux, 351 cours de la Libération, F-33400 Talence, France

² NOBATEK/INEF4, Esplanade des Arts et Métiers, 33400 Talence, France

Mots clés : Système solaire combiné, calibration, optimisation, analyse exergetique, contrôle optimal

Résumé :

En France, le secteur du bâtiment est responsable de 45

L'objectif de ce travail est d'augmenter les performances globales de cette installation grâce à des méthodes d'optimisation employées à la fois pour améliorer le dimensionnement et choisir les stratégies de contrôle.

L'étude d'un tel système dans son environnement, couplé à un bâtiment et soumis à la disponibilité solaire, fait intervenir différents modèles physiques et entraîne donc un haut degré de complexité. De par son approche acausale, qui offre la modularité nécessaire à l'étude de différentes combinatoires et de stratégies de contrôle variées, le langage Modelica a été choisi pour modéliser le comportement de l'installation. Le premier objectif consiste à calibrer ce dernier en le confrontant aux données issues de l'expérimentation, dans un premier temps à l'échelle du composant puis au niveau du modèle complet. Cette étape demande une grande expertise et peut s'avérer fastidieuse, le recours à des méthodes intelligentes telles que les algorithmes génétiques ou prédictifs est donc envisagé.

Des méthodes d'optimisation multi-objectifs seront ensuite mises en place afin d'orienter le choix du dimensionnement et des stratégies de contrôle. Pour cela, l'approche par analyse exergetique a fait l'objet de plusieurs recherches ces dernières années et a démontré un intérêt certain. En permettant de repérer et de quantifier les irréversibilités présentes dans l'installation, il est possible d'introduire des indicateurs de potentiel d'amélioration, et ainsi mieux orienter les choix d'optimisation. Cette approche comparée à une approche basée sur le bilan énergétique permettra de renseigner sur la pertinence d'une telle méthode. Enfin, les gains énergétiques d'un contrôle optimal seront estimés sur une longue période d'utilisation afin d'envisager la mise en œuvre d'un contrôle avancé sur l'installation réelle.

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

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

* ✉ : badr.ouzzine@univ-eiffel.fr

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

Mots clés : Géothermie, 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 régissant 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 400 m². 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.

Contribution à la modélisation numérique des phénomènes convectifs dans une enceinte chauffée.

Hiva Shamsborhan^{1,*}, Sébastien Menanteau¹, Fadi Abdel Nour²

* ✉ : hiva.shamsborhan@icam.fr

¹ Domaine Energétique, Environnement et Matériaux, Icam Lille, 6 rue Auber, 59016 Lille

² IUT de Béthune, LGCgE, 1230 rue de l'Université CS20819 62400 Béthune

Mots clés : Convection naturelle, confort thermique, simulation numérique.

Résumé :

Le confort thermique des personnes dans une enceinte chauffée peut parfois être problématique en raison de la stratification de la température et des mouvements d'air causés par la formation de cellules de convection. La modélisation numérique de ces phénomènes peut ainsi s'avérer intéressante dans le but de mieux appréhender leurs mécanismes ou de diagnostiquer d'éventuelles zones d'inconfort pour l'utilisateur. Pour autant, ces études numériques peuvent être complexes à mener, notamment en raison des sources d'incertitudes liées aux conditions limites souvent peu maîtrisées pour de tels espaces, les solutions obtenues pouvant en outre fortement dépendre des méthodes numériques sélectionnées. Dans le but d'investiguer les performances des modèles numériques en convection naturelle, une maquette expérimentale aux conditions thermiques parfaitement maîtrisées a ainsi été développée. Cette maquette positionnée dans une chambre climatique thermo-régulée, est chauffée au moyen d'un flux de chaleur constant et présente une ouverture afin d'engendrer un mouvement convectif d'air. Elle a été instrumentée de manière à obtenir une cartographie précise de la température intérieure en vue de comparer ces mesures à un ensemble de simulations numériques réalisées au moyen d'Ansys Fluent. L'aptitude de différentes approches de modélisation a ainsi pu être comparée en vue de déterminer les meilleurs usages possibles de l'outil numérique pour résoudre la thermique de l'écoulement.

L'ensemble des études paramétriques nous a permis de prendre connaissance des bonnes pratiques pour la simulation numérique de la maquette. Le modèle instationnaire, en prenant en compte le rayonnement thermique couplé avec la convection naturelle, est le plus adapté au phénomène physique. Egalement, bien que les parois de la maquette soient fabriquées avec des matières isolantes, l'attribution d'un faible coefficient de convection aux parois présente une meilleure cohérence avec les résultats expérimentaux. La prise en compte des propriétés de l'air variant avec la température selon les fonctions polynômes présente mieux l'existence des cellules convectives près des parois.

Analyse d'un système de micro-cogénération biomasse

Stefan-Dominic Voronca^{1,*}, Monica Siroux¹, George Darie², Jean-Baptiste Bouvenot¹

* ✉ : sdvoronca@gmail.com

¹ INSA Strasbourg Laboratoire ICUBE, Université de Strasbourg

² Département de Génération et d'Usage de Puissance, Université Politehnica de Bucarest

Mots clés : micro-cogénération, biomasse, moteur Stirling, bâtiment, production d'énergie

Résumé :

La micro-cogénération est une technologie par laquelle on produit simultanément de l'électricité et de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des logements, d'une manière décentralisée. La puissance électrique produite est inférieure à 50 kW_{el}. En utilisant la biomasse en tant que combustible on a plusieurs avantages : on utilise de l'énergie renouvelable, la neutralité carbon, la disponibilité et le bas-prix. Dans cette étude, une installation de micro-cogénération biomasse à moteur Stirling développée par l'entreprise ÖkoFEN a été testée pour caractériser ses performances énergétiques. Le moteur Stirling est un moteur à piston libre de type dynamique. En plus du moteur Stirling, l'unité comprend une chambre combustion et des échangeurs de chaleur pour récupérer la chaleur des gaz de combustion. Le système utilise la technologie de condensation pour augmenter son efficacité. La puissance électrique nominale de l'installation de micro-cogénération biomasse est de 1 kW. La puissance thermique du système de micro-cogénération varie entre 10 et 14 kW. L'installation de micro-cogénération biomasse a été testée au sein du laboratoire INSA Strasbourg ICUBE. L'objectif de l'étude expérimentale a été d'observer l'influence du débit de l'agent thermique et de la puissance de sortie thermique sur le comportement de l'installation de micro-cogénération. Les essais ont été effectués pour neuf configurations différentes correspondant à trois débits de l'agent thermique différents et à trois puissances de sortie thermique différentes : 10 kW, 12 kW et 14 kW. Les températures et les débits ont été mesurés à l'aide des capteurs de température et de débitmètres. Le rendement global et les rendements thermique et électrique ont été déterminés pour chaque configuration. Les résultats obtenus ont montré que, si le débit n'est pas suffisant pour évacuer la puissance thermique produite par l'unité de micro-cogénération, la température de l'agent thermique va augmenter, réduisant ainsi les performances thermiques du système. Ces travaux expérimentaux ont permis de réaliser un modèle du système de micro-cogénération biomasse.

Etude de l'amélioration d'un panneau aérovoltaïque installé sur un bâtiment à faibles besoins énergétiques

Benoit Liemans^{1,*}, Véronique Feldheim¹, Serge Russeil², Daniel Bougeard²

* ✉ : benoit.liemans@umons.ac.be

¹ UMONS – FPMs – Thermique et Combustion

² IMT Lille Douai - CERI Energie Environnement

Mots clés : photovoltaïque convection modèle simplifié

Résumé :

Les panneaux photovoltaïques convertissent le flux solaire reçu en électricité avec un rendement de référence de l'ordre de 17% pour les technologies répandues à base de cellules de silicium monocristallin. Malheureusement, ce rendement se dégrade dès lors que la température de ces dernières dépassent les 25 °C. Un panneau en pose libre ne peut se refroidir que majoritairement par convection naturelle et légèrement par rayonnement avec respectivement l'air ambiant et son environnement. Le problème connu est que généralement lorsque le flux solaire est important, la température de l'air extérieur est également plus élevée et le refroidissement est donc plus difficile. Dans la pratique, la situation est encore plus compliquée lorsque le panneau est posé sur une paroi de bâtiment, comme en toiture par exemple.

Afin de solutionner ce problème, de nombreux systèmes ont été étudiés comme 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 rarement concernant l'amélioration possible du coefficient d'échange thermique par convection avec l'air ambiant autrement que par le passage en convection forcée par le biais de ventilateurs.

Une étude récente 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. L'avantage de ce type d'élément est de ne nécessiter aucune source d'énergie supplémentaire, d'exiger peu de matière et de réduire au mieux les pertes de charges engendrées.

Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier un panneau photovoltaïque modifié, à l'arrière duquel une structure de canal va être équipée d'ailettes génératrices de vortex. Le refroidissement du panneau PV va être réalisé grâce à l'air extérieur ambiant, dans un système éventuellement lié à la ventilation mécanique du bâtiment.

Les premiers résultats obtenus concernent l'étude numérique dynamique du pavillon expérimental sur base des plans d'exécution mais également l'établissement d'un modèle simplifié du panneau équipé de sa structure additionnelle destiné à être affiné à partir des résultats de futures études CFD visant à optimiser le nombre et la répartition des générateurs de vortex.

Nous pouvons déjà constater d'une part que le pavillon a de faibles besoins en chauffage et d'autre part qu'il est sujet à un risque de surchauffe estivale relativement élevé. Le modèle simplifié du panneau amélioré avec les générateurs de vortex nous permet d'envisager à ce stade un gain probable de l'ordre de 30% sur les gains thermiques.

Thème 6

Thermique appliquée - échangeur

Multi-objective design optimization of a hybrid renewable energy system	78
Modélisation numérique et intégration d'un désorbeur à plaques et films tombants dans un prototype de machine à absorption eau-ammoniac	79
Vaporisation ascendante d'un mélange binaire d'HFC dans un passage d'ailettes décalées	80
Optimisation des paramètres d'un échangeur de chaleur avec agitateur par la méthode taguchi et l'algorithme génétique	81
Analyse du profil de température et de création d'entropie dans un évaporateur à film tombant	82
Optimisation d'un microéchangeur à partir d'un bilan entropique	83
Étude des performances de climatiseurs individuels en climat tropical	84
Etude expérimentale et modélisation dynamique 0D d'un échangeur air-gaz brûlés pour une unité de micro-cogénération biomasse	85
Logiciel pour optimisation des échangeurs à plaques avec variabilité et adaptabilité augmentées	86

Multi-objective design optimization of a hybrid renewable energy system

Sonja Kallio¹, Monica Siroux^{1,*}

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

¹ INSA Strasbourg ICUBE Strasbourg University

Mots clés : renewable energy, photovoltaic-thermal, micro cogeneration, multi-objective optimization, hybrid energy system

Résumé :

A photovoltaic-thermal (PVT) collector is a solar-based micro-cogeneration system which generates simultaneously heat and power for buildings. A hybrid renewable energy system consists of one or more renewable energy sources combined with energy storages and provides energy for a certain energy demand. To maximize the self-consumption and autonomy of renewable energy sources, the optimal size of the hybrid energy system components has to be determined. To find an optimal size of the components can lead conflicting objectives in terms of investment costs and system reliability. In recent years, the design methods have got alongside new design methods using nature inspired artificial intelligence methods, such as genetic algorithm (GA), evolutionary algorithm and particle swarm optimization (PSO). In this paper, a dynamic Matlab/Simulink model of the hybrid renewable energy system, including PVT collectors, lithium-ion battery system and thermal storage, is proposed. The system provides domestic hot water (DHW) and electricity for residential building use. The electricity demand profile of a residential user is taken from statistics for different seasons and day types. The hourly yearly weather data of Strasbourg is used to estimate PVT energy production. A new approach to optimize the sizing of the hybrid system is proposed. The elitist Non-Dominated Sorting Genetic algorithm (NSGA-II) is applied to the model to solve a multi-objective optimization problem. The formulation of the 3-dimensional optimization problem aims to minimize the initial investment costs and maximize thermal and electrical reliability of the system, simultaneously. The number of the PVT collectors in series and parallel, capacity of the battery system, thermal storage volume and coolant mass flow rate are applied as design parameters. As a result, the Pareto optimal front is generated with freedom to choose an optimal solution for a desired design. The variation between the optimal solutions was discussed and three solutions were selected. In the case with the best reliability, 41% of the yearly heating demand and 60% of the yearly electricity demand were covered by the PVT collectors, and the initial investment of the system was 22601 €.

Modélisation numérique et intégration d'un désorbeur à plaques et films tombants dans un prototype de machine à absorption eau-ammoniac

Mathilde Wirtz^{1,*}, Benoit Stutz², Hai Trieu Phan³, François Boudéhenn⁴

* ✉ : mathilde.wirtz@cea.fr

¹ CEA - Liten / LOCIE

² LOCIE

³ CEA - Liten

⁴ CEA - Liten

Mots clés : Désorbeur ; Machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$; Modélisation numérique ; Prototype expérimental

Résumé :

Depuis quelques années, la demande en climatisation connaît un essor particulier, notamment dans les secteurs des bâtiments commerciaux et institutionnels, et dans le secteur industriel. L'utilisation de machines frigorifiques à absorption alimentées par énergie solaire thermique, par des sources de chaleur fatale, ou via les réseaux de chaleur dispense à la fois la production de froid requise, tout en valorisant ces sources. Les machines à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ offrent la possibilité de produire du froid négatif, ont une bonne compacité, et sont favorables à l'optimisation des transferts internes de chaleur et de masse. Cependant, le faible écart de volatilité entre l'absorbant (H_2O) et le réfrigérant (NH_3), induit la nécessité de l'utilisation d'un rectifieur en sortie du générateur, afin d'éliminer les traces d'eau dans la vapeur d'ammoniac produite.

Afin de produire une vapeur d'ammoniac purifiée et de garantir une configuration de machine $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ compacte et efficace, un nouveau composant appelé « désorbeur » a été développé. Il s'agit d'un échangeur de chaleur à plaques et films tombants composé d'une section de génération de vapeur par un fluide caloporteur circulant à contre-courant qui chauffe la solution eau-ammoniac ; et d'une section adiabatique ayant pour rôle la rectification de la vapeur par réabsorption partielle afin d'améliorer sa pureté en NH_3 .

Dans un premier temps, un modèle numérique de ce désorbeur est développé au travers des bilans de masse, d'espèces et d'enthalpie, des corrélations de transfert de masse et de chaleur, ainsi que des équations d'équilibre à l'interface. Pour une modélisation plus simple et robuste de ce composant, des corrélations d'efficacité caractérisant les performances internes du désorbeur sont proposées. Ensuite, un modèle numérique simulant une machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ est développé, intégrant le désorbeur caractérisé par ses efficacités.

Dans un deuxième temps, le désorbeur est conçu, fabriqué et implanté dans un prototype de machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ de capacité 5 kW de froid. Il remplace l'ensemble générateur, rectifieur et bouteille de séparation liquide-vapeur initialement assemblés. Diverses études paramétriques sont menées, montrant l'impact des variables d'entrée du désorbeur, et des autres composants, sur les performances de la machine. Une comparaison numérique / expérimentale des performances de la machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ est également développée dans cette étude.

Vaporisation ascendante d'un mélange binaire d'HFC dans un passage d'ailettes décalées

Ines Ben El Mekki^{1,*}, Marine Andrich², Marc Wagner², Florine Giraud³, Brice Tréméac³, Pascal Tobaly³

* ✉ : ines.benelmekki@airliquide.com

¹ Doctorante AIR LIQUIDE / LAFSET CNAM

² AIR LIQUIDE

³ LAFSET CNAM

Mots clés : ailettes décalées, vaporisation ascendante, fluide binaire

Résumé :

L'utilisation des échangeurs à plaques et ailettes a été élargie aux procédés cryogéniques tel que la liquéfaction du gaz naturel et aux systèmes de réfrigération. Les ailettes les plus utilisées dans ces évaporateurs sont les ailettes décalées car elles favorisent l'homogénéisation de l'écoulement et empêchent l'établissement des couches limites thermiques afin de favoriser la turbulence et améliorer ainsi le transfert thermique. Bien que l'ébullition des fluides purs dans des géométries à ailettes décalées ait été intensivement étudiée dans la littérature, la combinaison entre les fluides binaires et les ailettes décalées n'a pas été largement investiguée.

Cette présente étude vise ainsi à comprendre et analyser expérimentalement le couplage entre les différents phénomènes physiques ayant lieu lors de la vaporisation ascendante d'un mélange binaire dans un passage à ailettes décalées. Plusieurs aspects ont été examinés simultanément. Le premier aspect concerne l'hydrodynamique de l'écoulement diphasique en analysant l'impact des ailettes décalées sur les cartes et les régimes d'écoulement ainsi que la perte de charges diphasique. Le deuxième aspect consiste à l'étude thermodynamique de la vaporisation des mélanges binaires. Le dernier aspect concerne le transfert thermique en analysant l'impact des fluides binaires sur les mécanismes de transfert de chaleur.

Afin d'étudier le couplage entre ces différents aspects, un banc expérimental a été conçu et fabriqué pour étudier la vaporisation ascendante d'un mélange binaire équimolaire de R-134a et R-245fa. La pression opératoire dans la section d'étude est comprise entre 2 et 5 bar absolu, la vitesse massique est comprise entre 11 et 35 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ et le flux thermique entre 1 et 29 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

La section d'étude est composée d'un seul passage d'ailettes décalées dont la densité est de 826 ailettes par mètre. Les sections de passage sont rectangulaires avec une surface de 7 mm^2 et de diamètre hydraulique de 1,75 mm. Ce passage est compris entre une plaque de polycarbonate capable de visualiser l'écoulement diphasique et un bloc d'aluminium chauffé électriquement. Une résistance chauffante en film adhésif est collée à l'arrière du vaporisateur afin de fournir la chaleur nécessaire à la vaporisation du mélange binaire.

Le coefficient de transfert thermique local est calculé à partir des mesures de flux thermiques et des températures dans le fluide et dans la paroi. Un capteur de pression différentiel permet de mesurer la perte de charge totale obtenue dans la section d'essai. Les résultats expérimentaux du coefficient de transfert thermique ainsi que la perte de charge sont comparés avec des corrélations trouvées dans la littérature.

Optimisation des paramètres d'un échangeur de chaleur avec agitateur par la méthode taguchi et l'algorithme génétique

Sihem Bouzid^{1,*}, Larbi Bendada¹, Nacer Hebbir², Yamina Harnane³

* ✉ : sihembouzid69@gmail.com

¹ Université d'Oum El Bouaghi, Algérie. Laboratoire conception et modélisation avancée des systèmes mécaniques et thermo fluides. Oum El Bouaghi

² Université d'Oum El Bouaghi, Algérie. Laboratoire des Matériaux et Structure des Systèmes Électromécaniques et leurs Fiabilité (LMSEF)

³ Université d'Oum El Bouaghi, Algérie. Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), Biskra

Mots clés : échangeur de chaleur, optimisation, Taguchi, algorithmes génétiques

Résumé :

Dans le domaine industriel, les ingénieurs énergéticiens ont besoin de savoir l'optimum de fonctionnement des échangeurs de chaleur dans un équipement donné. Cette information leur permet de décider quel échangeur est le meilleur pour leur construction, et si l'échangeur existe déjà quels sont les paramètres de fonctionnement optimaux pour assurer les rendements attendus. La réaction chimique nécessitant une homogénéisation de la température requiert un échangeur de chaleur avec agitateur. Notre étude a été réalisée sur un banc d'essai de ce type (TD360d) en deux parties : Réalisation des tests de fonctionnement de l'échangeur en agissant sur trois paramètres : débit de fluide chaud, vitesse de rotation de l'agitateur et température d'entrée du fluide chaud ; puis l'utilisation des algorithmes de Taguchi et génétiques afin d'optimiser ces paramètres pour maximiser l'efficacité de l'échangeur. Deux méthodes ont été utilisées pour optimiser l'efficacité thermique de l'échangeur de chaleur. Une étude paramétrique préliminaire de 54 tests fonctionnels a été menée. Les paramètres de fonctionnement sont le débit du fluide chaud, la température d'entrée et la vitesse de rotation de l'agitateur. Deux modes de fonctionnement ont été considérés : le mode serpentin et le mode enveloppe. L'analyse de Taguchi a permis d'optimiser les niveaux de paramètres : A1B3C1 (A : débit, B : vitesse, C : Température) pour le mode serpentin et A3B3C1 pour le mode enveloppe. L'efficacité moyenne de l'échangeur de chaleur est de 0,2964 et 0,4100 respectivement dans les boîtiers de serpentin et d'enveloppe. L'évaluation des générations pour l'optimisation du rendement est d'environ 20 générations avec un optimum égal à 0,2952 et 0,3365 pour les modes serpentin et enveloppe, respectivement. Les meilleures valeurs des individus obtenues via l'Algorithme Génétique (AG) pour l'optimisation de l'efficacité sont A3B1C1 en mode serpentin et A1B1C1 en mode Enveloppe. On conclut que l'efficacité Optimum de fonctionnement de l'échangeur de chaleur de ce type atteint 41% en mode enveloppe pour un débit 3l/min, une vitesse de rotation 100, une température d'entrée chaude 40°C.

Analyse du profil de température et de création d'entropie dans un évaporateur à film tombant

Arnat Mahamoudou^{1,*}, Nolwenn Le Pierrès¹, Julien Ramousse¹

* ✉ : arnat.mahamoudou@univ-smb.fr

¹ Laboratoire LOCIE, CNRS UMR5271 – Université Savoie Mont-Blanc, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

Mots clés : Echangeur de chaleur, Film tombant, Profil de température, Création d'entropie

Résumé :

Les échangeurs de chaleur étant des composants clé de tout système de réfrigération et de chauffage, l'amélioration des transferts thermiques qui leur sont associés est importante pour obtenir une plus grande efficacité. Ce travail se focalise sur un évaporateur à film tombant qui peut être utilisé dans une machine à sorption. Un film laminaire de fluide incompressible s'écoulant sous l'effet de la gravité sur une plaque verticale chauffée au moyen d'un fluide caloporteur en co-courant est étudié. Ce film est le siège de phénomènes thermiques conduisant à une évaporation à la surface libre, supposée à température de saturation, constante le long du film. Afin d'identifier les leviers à l'échelle locale permettant d'améliorer les performances à l'échelle du composant, cette étude vise à déterminer le champ de température et les créations d'entropie locales en appliquant la Thermodynamique des Processus Irréversibles. Le profil de température est obtenu en résolvant l'équation de la chaleur par la méthode des différences finies, en supposant un profil de Nusselt pour la vitesse du fluide sous les hypothèses suivantes : régime stationnaire, phénomènes de conduction négligés dans le sens de l'écoulement, épaisseur et propriétés physiques du film constant. L'étude a été réalisée pour des nombres de Reynolds du fluide caloporteur (Re_{fc}) allant de 45 à 360 et pour un nombre de Reynolds du film tombant de l'ordre de 13. Les résultats démontrent que la masse évaporée est impactée par le débit du fluide caloporteur, la longueur du film et la différence de température entre l'entrée du film tombant et la température d'évaporation (film surchauffé). En effet, lorsque la surchauffe du film en entrée est nulle, le débit évaporé représente 1.74% du débit du film pour $Re_{fc} = 45$ et 2.93% pour $Re_{fc} = 360$ sur 0.1 mètre de longueur. De plus, l'augmentation de la différence de température entre l'entrée du film tombant et la température d'évaporation (écart à l'équilibre thermique) conduit à un développement plus rapide de la couche limite thermique et donc, à un débit évaporé plus élevé. Dans le cas d'une surchauffe de 4.5K, il y'a une augmentation du débit évaporé de 0.46% comparé au cas sans surchauffe pour un $Re_{fc} = 360$ sur 0.1 mètre. La création d'entropie du film étudié est due à la création d'entropie d'origine thermique et à la création d'entropie d'origine visqueuse due aux frottements. La création d'entropie visqueuse est plus grande au niveau de la plaque verticale et diminue à mesure que l'on se rapproche de la surface libre. Toutefois, cette création reste négligeable – ordre de $10^{-6} \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^3)$ – devant la création d'entropie thermique – ordre de 1 à 500 $\text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^3)$. La création d'entropie totale est impactée par le débit et la conductivité des deux fluides ainsi que la température d'entrée du film tombant.

Optimisation d'un microéchangeur à partir d'un bilan entropique

Emna Dellali², François Lanzetta^{1,*}, Sylvie Bégot¹, Jean-Yves Rauch¹

* ✉ : francois.lanzetta@univ-fcomte.fr

¹ FEMTO-ST-UBFC-CNRS

² FEMTO-ST

Mots clés : entropie, micro-échangeur, écoulement, transfert de chaleur

Résumé :

Le développement quasi exponentiel des MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) dans l'industrie permet d'accroître la densité de composants sur différents supports électroniques et informatiques. L'augmentation résultante des sources de chaleur nécessite alors d'intensifier les transferts thermiques dans le but de refroidir ces composants. Le développement des micro-systèmes tire profit de la technologie MEMS. En effet, à ces échelles miniatures, des procédés de micro-fabrication sont utilisés pour la réalisation des prototypes. Nous avons ainsi conçu un micro-échangeur à base d'assemblages de parois en verre et silicium constituant des canaux de dimensions micrométriques pouvant être traversés par un gaz tel que l'azote, l'argon ou l'hélium.

L'objectif de cet article est de déterminer les performances optimales d'un micro-échangeur. Les écoulements en microcanal avec transfert de chaleur sont le siège de transferts thermiques et de pertes de charge fonctions de conditions géométriques (diamètre hydraulique, longueur, surface) et thermofluidiques (masse volumique, viscosité, chaleur spécifique). La disparité dans les résultats obtenus dans la littérature concernant les micro-écoulements en régime permanent est essentiellement due aux effets de raréfaction, de rapport d'aspect du micro-canal et de la rugosité de la paroi. En effet, des études portées sur des micro-échangeurs thermiques montrent que les échanges thermiques sont nettement améliorés contre une augmentation de pertes de charge pour les micro-écoulements. Des études effectuées sur des micro-écoulements d'azote, d'hélium et d'argon montrent qu'en régime laminaire, pour des faibles débits massiques, le coefficient d'échange thermique convectif se trouve réduit par rapport à celui escompté par calculs, ce décalage étant plus notable pour des faibles débits. Il est également souligné l'importance de la conduction axiale dans les parois et sa prépondérance par rapport à celle dans le fluide ce qui favorise le mélange et diminue ainsi l'efficacité du micro-échangeur.

Un bilan entropique permettra de distinguer, sous la forme d'un facteur adimensionnel de production d'entropie, la part entre les irréversibilités fluidiques et thermiques en fonction du débit de gaz, du gradient de température entre le gaz et les parois, du coefficient de frottement et du nombre de Reynolds.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-041>

Étude des performances de climatiseurs individuels en climat tropical

Etienne Billard¹, Thomas Le Cocq¹, Fabien Picgirard², Guillaume Hoarau³, Jean-François Martin¹, Jean Castaing-Lasvignottes¹, Olivier Marc^{1,*}

* ✉ : olivier.marc@univ-reunion.fr

¹ PIMENT

² ADEME

³ EDF

Mots clés : Climatiseurs individuels, banc de test, charge partielle, Energy Efficiency Ratio

Résumé :

Situé dans l'Océan Indien près de Madagascar, l'île de La Réunion présente un contexte énergétique particulier dans la mesure où elle est une Zone Non Interconnectée (ZNI) et l'équilibre production - consommation se fait donc à l'échelle de l'île. Le mix énergétique est très carboné (680 g CO₂/kWh) car il est constitué à 64% d'énergies fossiles (fioul, charbon) et à 36% d'énergies renouvelables. Le secteur du bâtiment représente environ 80% de la consommation électrique de l'île dont la moitié pour la climatisation, qui est un des postes les plus énergivores de l'île. Face à ce constat, un projet visant à réduire la consommation électrique des systèmes de climatisation individuels sur l'île est mené par EDF et l'ADEME en partenariat avec le laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion. L'objectif est de déterminer les modèles les plus vertueux pour les valoriser sur le marché réunionnais.

Afin de mener à bien ce projet, les tests sont réalisés sur un banc d'essai constitué de deux enceintes mitoyennes contrôlées en température et en humidité. La première simule les besoins thermiques du bâtiment, l'autre les conditions climatiques extérieures réunionnaises et le système étudié est installé à l'interface de ces dernières. En premier lieu, ce papier présente le banc de test : l'instrumentation, les appareils de mesures et de contrôles, ainsi que les résultats expérimentaux pour un modèle de climatiseur 7000 BTU/h de classe énergétique A+++ . Afin d'en étudier les performances, nous avons retenu principalement deux indicateurs : la consommation électrique et le coefficient EER (Energy Efficiency Ratio). L'étude évalue, explique et quantifie l'influence de 4 conditions de fonctionnement sur ces indicateurs : le pourcentage de la charge nominale de la climatisation (100%, 74%, 47%, 21%), la température extérieure (35°C, 30°C, 25°C, 20°C), la température intérieure (de 21°C à 28°C avec un pas de 1°C) et l'hygrométrie intérieure (avec ou sans apport de chaleur latente). Un autre indicateur pertinent est le SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) qui permet d'associer une classe énergétique au climatiseur. D'après la norme NF EN 14825, il est calculé grâce aux tests à charges partielles en pondérant les EER obtenus expérimentalement avec le nombre d'heures d'utilisation de la climatisation pour une température extérieure associée. L'analyse du climat Réunionnais montre des différences notables entre les heures d'utilisation données par la norme et celles rencontrées localement. A l'image du calcul du SCOP pour les pompes à chaleur qui tient compte de l'hétérogénéité des climats européens, nous choisissons de distinguer l'usage d'un climatiseur en résidentiel ou en tertiaire. Pour qualifier la performance de ces derniers et afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement, nous interagissons avec le climatiseur uniquement en imposant la température de consigne via la télécommande. Les résultats obtenus montrent que l'EER passe par un maximum pour un taux de charge compris entre 50% et 100% et que le SEER local s'éloigne de celui calculé selon la norme. Enfin, à température de consigne identique, on note une modification des performances obtenues lorsque le climatiseur fonctionne avec une forte humidité intérieure.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-042>

Etude expérimentale et modélisation dynamique 0D d'un échangeur air-gaz brûlés pour une unité de micro-cogénération biomasse

Fateh Mameri¹, Jesse Schiffler², Eric Delacourt¹, Céline Morin^{1,*}

* ✉ : celine.morin@uphf.fr

¹ LAMIH UMR CNRS 8201 - Université Polytechnique Hauts-de-France

² Laboratoire ICube UMR 8201 - Université de Strasbourg

Mots clés : échangeur air-gaz brûlés, étude expérimentale, modélisation dynamique, transferts convectifs et radiatifs, méthode inverse

Résumé :

L'unité de micro-cogénération développée est constituée d'une chaudière biomasse d'une puissance de 30 kW, d'un moteur à air chaud de type Ericsson dédié à la production d'électricité et d'un échangeur de chaleur air-gaz brûlés inséré dans la chambre de combustion de la chaudière, échangeur qui permet d'alimenter en air chaud le moteur Ericsson. Une étude a été menée sur un échangeur de chaleur modèle qui doit résister à des températures élevées et à un environnement sévère (risque d'encrassement dans le pot de combustion de la chaudière). Une approche expérimentale a été conduite pour caractériser les échanges thermiques entre les gaz brûlés de la chaudière et l'air circulant à l'intérieur de l'échangeur, ainsi qu'une approche numérique avec le développement d'un modèle dynamique 0D sous le formalisme Bond Graph. L'échangeur de chaleur « modèle » est un tube en U et peut être divisé en trois zones suivant la direction de l'écoulement des deux fluides (air et gaz brûlés) : une zone counter-flow, une zone cross-flow et une zone co-flow. L'échangeur a été instrumenté à l'aide de plusieurs thermocouples afin de mesurer la température de l'air et de la paroi durant les essais et de capteurs de pression piézorésistifs pour évaluer les pertes de charge. L'effet de quatre paramètres (température de l'air, pression de l'air, débit de l'air et température de consigne imposée à la chaudière) sur les échanges de chaleur air – paroi a été étudié. La température de l'air mesurée dans la zone counter-flow demeure très faible par rapport à la zone co-flow alors que l'échangeur est plongé dans une chambre cylindrique et que la flamme se développe de façon axisymétrique. Un modèle dynamique 0D de l'échangeur air – gaz brûlés a été développé avec le formalisme Bond Graph pour simuler le comportement thermique de l'air circulant à l'intérieur. Une première étape a été de mener une étude CFD afin d'estimer la valeur des coefficients convectifs globaux dans chaque partie de l'échangeur pour alimenter le modèle 0D. Les coefficients des échanges de chaleur entre les gaz brûlés et la paroi de l'échangeur ramenés à la surface d'échanges côté gaz brûlés sont obtenus par méthode inverse. Ils incluent les effets convectifs et radiatifs. Le modèle 0D a été validé en comparant les profils expérimentaux et calculés de la température de l'air et de la paroi du tube dans les deux zones counter-flow et co-flow. Un très bon accord a été obtenu.

Logiciel pour optimisation des échangeurs à plaques avec variabilité et adaptabilité augmentées

Albert Thomas Haugg^{1,*}

* ✉ : Albert.T.Haugg@akg-gruppe.de

¹ Head of New Developments, AKG Thermotechnik International

Mots clés : Echangeurs optimisés-Réduction des émissions CO₂-Consommation d'énergie minimisée

Résumé :

La contribution de l'industrie des échangeurs de chaleur et des radiateurs à l'accord de Paris pour la réduction des émissions CO₂ consiste principalement en l'augmentation de leur efficacité, d'une part en améliorant la transmission spécifique d'un échangeur et, d'autre part, en réduisant la perte de pression, ce qui engendre automatiquement une baisse de la consommation d'énergie pour cette transmission. L'idéal serait d'atteindre ces deux objectifs simultanément.

Les caractéristiques physiques d'un liquide en changement de phase varient substantiellement. Un échangeur doit par conséquent respecter ces modifications, ce qui n'est pas le cas pour les échangeurs à plaques largement en utilisation, si la source chaude ou froide pour l'évaporation ou la condensation est un liquide.

La société AKG développe actuellement un échangeur à plaques SSC (Stacked Shell Cooler / échangeur à plaques empilé) qui offre ces possibilités : plusieurs passages, élargissement ou réduction du volume par passage pour le réfrigérant avec également la faculté d'adaptation aux exigences de l'application en débit et perte de pression. De plus, et ceci diffère des échangeurs à plaques en inox, les structures internes (turbulateurs) sont échangeables. Ceci permet d'augmenter la transmission spécifique et de réduire la perte de pression.

L'adaptabilité a été présentée l'année passée lors du congrès « IIR International Conference Rankine 2020 – Applications of Cooling, Heating and Power Generation » avec des premiers résultats et actuellement un logiciel est en développement pour établir un mode de calcul dont l'objectif est l'optimisation de ces échangeurs avec leur complexité significativement accrue. Les buts essentiels consistent à augmenter le coefficient d'échange spécifique et par cela réduire le volume et les dimensions ainsi que la perte de pression, ce qui signifie une consommation d'énergie minimisée.

La variabilité permet a) d'avoir différents turbulateurs (structures internes) pour les deux fluides mais aussi d'utiliser divers modèles de turbulateurs dans les différentes couches pour un fluide - il est même pensable de changer la structure interne dans une seule couche - b) de configurer le passage dans une couche (en plan horizontal) en I, X ou U - c) de choisir entre uni- ou multi-passage et cela pour les deux fluides séparément et indépendamment - d) de distribuer le nombre des couches librement pour les deux fluides.

Le développement d'un logiciel qui permettra d'optimiser toutes ces possibilités se fera par étape avec plusieurs itérations nécessaires. D'abord, il s'agit de déterminer l'équation la plus appropriée pour une seule couche avec différents turbulateurs et différents passages.

Cette adaptabilité accrue signifie un potentiel d'amélioration substantiel pour ces échangeurs et engendre une augmentation significative en rendement dans les applications pompe à chaleur, machine à réfrigérer, Cycle de Rankine Organique (CRO) ou autre, ce qui accélère l'évolution de ces technologies tout comme leur propagation. Ceci permet non seulement l'utilisation plus efficace de l'énergie mais aussi partiellement la réutilisation des chaleurs fatales et contribue aux réductions des émissions CO₂ dans notre industrie.

Work In Progress

Thème 7

Transferts en milieux hétérogènes

Simulation de l'écoulement dispersé vapeur/gouttes dans des conditions d'APRP	88
Transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Application au séchage de la bagasse de canne à sucre par comparaison numérique et expérimentale.	89
Bulles d'eau à pression sub-atmosphérique : étude expérimentale et analyse dimensionnelle dans un canal vertical confiné	90
Modélisation individu centré de la condensation en goutte	91
Étude expérimentale de l'impact de la distribution fluide sur un stockage thermique de type thermocline	92

Simulation de l'écoulement dispersé vapeur/gouttes dans des conditions d'APRP

Juan Esteban Luna Valencia^{1,*}, Arthur V.S Oliveira¹, Alexandre Labergue¹, Tony Glantz², Georges Repetto³, Michel Gradeck¹

* ✉ : lunavale1@univ-lorraine.fr

¹ LEMTA, CNRS, UMR 7563, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54500

² IRSN PSN/SEMIA/LEMC, B.P. 3, 13 115 St-Paul-Lez-Durance Cedex, France

³ IRSN PRSN/RES/SEREX, B.P. 3, 13 115 St-Paul-Lez-Durance Cedex

Mots clés : APRP ; NECTAR ; Thermo-hydraulique ; Modèle mécaniste

Résumé :

Lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP), de l'eau est injectée dans le cœur du réacteur et un écoulement dispersé de vapeur et de gouttes se produit en aval du front de remouillage qui se propage dans les assemblages. Par conséquent, cet écoulement joue un rôle très important dans le refroidissement initial des crayons combustibles qui ne sont pas encore immergés dans l'eau. Ainsi, les assemblages peuvent être déformés avec certains sous-canaux bouchés en raison du gonflement des gaines combustibles. Cependant, le refroidissement des sous-canaux bouchés est dégradé en raison du flux de vapeur préférentiellement dévié vers les sous-canaux non ou moins bouchés. Dans un travail précédent, nous avons implémenté un modèle mécanistique dans un code de calcul (NECTAR) afin de calculer les transferts de chaleur et de masse mis en jeu entre l'écoulement polydispersé et les crayons ainsi que la dynamique des gouttes. Ce code a été validé par des mesures expérimentales avec trois géométries différentes représentant le gonflement de la gaine à l'échelle du sous-canal. Par ailleurs, l'IRSN a réalisé des mesures des taux de redistribution du débit dans un assemblage de 7×7 avec plusieurs crayons ballonnés pour différentes conditions géométriques (taux et longueur de bouchage et coplanarité) ainsi que pour différents débits. Les résultats ont montré que le taux de bouchage est le facteur prédominant pour la quantité de débit dévié. Dans cet article, l'objectif est d'analyser l'influence de la déviation du flux de vapeur sur les transferts de chaleur dans deux sous-canaux bouchés (61% et 90%) pour un débit de vapeur de 5kg/h à une température de 500 °C, un débit des gouttes de 10kg/h à température de saturation, et avec des crayons à 1000 °C comme température initiale, qui sont des conditions représentatives d'un APRP. La dissipation thermique interne totale est évaluée et les contributions des différents mécanismes impliqués sont analysées.

Transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Application au séchage de la bagasse de canne à sucre par comparaison numérique et expérimentale.

Paul Guillou^{1,*}, Olivier Marc¹, Laetitia Adelard¹, Daniel Madyira², Esther Akinlabi², Jean Castaing-Lasvignottes¹

* ✉ : paul.guillou@univ-reunion.fr

¹ Université de La Réunion - Laboratoire PIMENT

² Université de Johannesburg

Mots clés : Séchage, Milieux poreux, Modélisation, Simulation, Expérimentation

Résumé :

La biomasse représente une ressource renouvelable et abondante pouvant faire l'objet de différentes valorisations (énergétique, matériaux de construction, paillage agricole par exemple). Cependant ce type de matériau est caractérisé par une forte teneur en eau pouvant constituer un frein à son utilisation directe et qu'un séchage peut alors contribuer à lever. Un tel procédé est le siège de transferts de masse et de chaleur couplés en présence de différentes phases dans un milieu poreux. Pour étudier ce séchage, nous avons choisi deux approches complémentaires. La première est expérimentale et permet de rendre compte des spécificités de la biomasse tandis que la deuxième est numérique et permet de développer un modèle capable de rendre compte des comportements dynamiques expérimentaux observés. Cette démarche est appliquée à un matériau produit localement à l'île de La Réunion : la bagasse de canne à sucre.

L'approche expérimentale consiste à conditionner plusieurs kilogrammes de bagasse dans une géométrie cylindrique et disposée dans une enceinte thermorégulée. L'échantillon est instrumenté afin de permettre le suivi de la teneur en eau globale, de l'humidité relative locale et de la température à 9 positions différentes au cours du temps. Deux campagnes de séchages ont été réalisées pour deux températures de consignes constantes : 50°C et 60°C. Les résultats permettent notamment de mettre en avant la succession de plusieurs phases de séchage et d'obtenir la distribution spatiale de la température pour la comparaison avec les résultats numériques.

L'approche numérique a consisté à développer un modèle dynamique local en deux dimensions en considérant la biomasse comme un milieu continu équivalent et composé de trois phases (solide, gazeuse et liquide). Les équations de conservations, de transferts, d'états et d'équilibres sont établies sur l'ensemble du domaine et moyennées sur des volumes élémentaires représentatifs. Le système d'équations obtenu est résolu selon la méthode des volumes finis permettant d'obtenir les variables locales et globales des grandeurs précédemment suivies.

Une première comparaison des résultats expérimentaux et de simulation est réalisée sur la campagne de séchage de la bagasse à 50°C et a permis l'identification des 4 coefficients de transferts du modèle (massique et thermiques, internes et aux limites). Les deux premiers concernent les transferts par conduction de chaleur et par diffusion moléculaire de la phase gazeuse tandis que les deux derniers concernent les échanges externes massiques et thermique entre l'échantillon et l'air. Une deuxième comparaison est réalisée sur la deuxième campagne de séchage pour la température de consigne de 60°C afin de valider les coefficients précédemment identifiés. Les résultats obtenus permettent d'obtenir une bonne reproduction des dynamiques locales des températures aux différentes positions, de l'humidité relative au centre et de l'évolution globale de perte en eau de la bagasse pour les deux campagnes de séchages. Le modèle s'avère alors capable d'évaluer localement les flux thermiques et massiques mis en jeu dans un tel milieu.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2021-052>

Bulles d'eau à pression sub-atmosphérique : étude expérimentale et analyse dimensionnelle dans un canal vertical confiné

Patric Mantaropoulos^{1,*}, Florine Giraud¹, Brice Tréméac¹, Pascal Tobaly¹

* ✉ : patric.mantaropoulos@lecnam.net

¹ Lafset, Conservatoire National des Arts et Métiers

Mots clés : bulles, r718, subatmosphérique, évaporateur à plaques

Résumé :

Nombre de fluides de travail communément utilisés aujourd'hui pour la réfrigération sont soumis à des réglementations strictes, qui deviendront de plus en plus contraignantes dans le futur. En effet, l'impact environnemental de tels fluides, évalué par le PDO (Potentiel de Destruction de l'Ozone) et le PRG (Pouvoir de Réchauffement Global), est significatif. Dans ce contexte, la recherche de fluides alternatifs constitue un des efforts à fournir pour la transition énergétique. Parmi ces fluides alternatifs, l'eau apparaît comme un excellent candidat : naturel, sans impact environnemental et dont certaines propriétés thermo-physiques sont avantageuses. Néanmoins, l'utilisation de l'eau comme fluide frigorigène impose généralement de travailler à des pressions très faibles (de l'ordre du kPa). Or, bien que la dynamique de croissance de bulles à pression atmosphérique ait été étudiée pendant plus d'un siècle, les modèles développés semblent inadaptés pour décrire les phénomènes intervenant dans des conditions sub-atmosphériques. En effet, il a été mis en évidence que, dans ces conditions, des bulles de taille centimétrique se développent. Dans le cas particulier des échangeurs thermiques diphasiques, une étude expérimentale sur un canal d'évaporateur à plaques lisses a mis en lumière que la croissance et l'éclatement des bulles de vapeur forment un film liquide qui, par son évaporation, contribue en majorité aux échanges thermiques. Dans une optique d'optimisation de l'efficacité énergétique, il semble donc nécessaire d'avoir une meilleure compréhension de la formation de ce film liquide, et donc d'étudier le comportement des bulles le formant. Cette étude en est l'objectif. À partir d'une campagne expérimentale qui a permis de rassembler des enregistrements par caméra rapide dans une gamme de pressions allant de 10 à 50 mbar, plusieurs résultats ont pu être mis en évidence. Une première corrélation entre la hauteur de projection des gouttelettes et les caractéristiques physiques de la bulle (taille et vitesse) avait été précédemment établie (SFT2020). Depuis, afin d'affiner l'étude, une analyse dimensionnelle a été réalisée et l'impact de certains nombres adimensionnels sur la hauteur de projection des gouttelettes a été évalué. Il apparaît notamment que la hauteur de projection est corrélée aux nombres de Bond et de Weber.

Modélisation individu centré de la condensation en goutte

Jérémie Lethuillier^{1,*}, Marc Miscevic¹, Pascal Lavieille¹, Frédéric Topin²

* ✉ : lethuillier@laplace.univ-tlse.fr

¹ Laplace

² IUSTI

Mots clés : Condensation en goutte

Résumé :

La condensation en gouttes est un régime extrêmement efficace dans l'optique de gérer d'important flux de chaleur. De récentes études ont obtenu des coefficients de transfert allant jusqu'à 250 kW.m^{-2} . Afin de modéliser le coefficient de transfert lors de la condensation en gouttes, deux sous modèles sont nécessaires. Un premier modèle évaluant les transferts thermiques à l'intérieur de la goutte, ce qui permet par la suite de déterminer sa vitesse de croissance. Le modèle classiquement utilisé dans la littérature est basé sur un réseau de plusieurs résistances thermiques entre la phase vapeur et le substrat sous-refroidi.

Le second modèle concerne la détermination de la distribution de la taille des gouttes sur la surface. Actuellement cette distribution est calculée à partir d'un modèle hybride basé sur une loi semi-empirique pour les gouttes observables expérimentalement (c'est à dire les gouttes supérieures à quelques microns) et sur un modèle statistique pour les plus petites gouttes. Comme aucune données n'existent à ce jour pour valider la distribution des petites gouttes, une approche numérique de type individu centré a été utilisée afin de confronter ce modèle statistique.

L'approche de type individu centré permet de retrouver la distribution des grosses gouttes qui a été validée expérimentalement. En revanche, la distribution des gouttes de petites tailles est relativement différente. Dans les configurations considérées dans la présente étude, une analyse des principales hypothèses retenues dans l'approche statistique (en particulier, l'hypothèse d'un temps caractéristique de renouvellement constant τ quelle que soit la taille des gouttes) a révélé que le mécanisme principal de renouvellement de la surface est en réalité uniquement lié au coalescence des gouttes immobiles et non au balayage des gouttes en mouvement. A partir de ces résultats, une modification du modèle statistique est proposée et discutée, ainsi qu'une analyse de l'influence de ces hypothèses sur le coefficient de transfert.

Étude expérimentale de l'impact de la distribution fluide sur un stockage thermique de type thermocline

Ségoène Vannerem^{1,*}, Quentin Falcoz², Pierre Neveu³

* ✉ : segolene.vannerem@promes.cnrs.fr

¹ PROMES-CNRS

² PROMES-CNRS, UPVD

³ UPVD

Mots clés : thermocline, stockage chaleur sensible, distributeur fluide, centrales cylindro-paraboliques, expérimental

Résumé :

Dans le contexte de transition vers les énergies renouvelables, l'utilisation de la ressource solaire présente des avantages majeurs tels que sa gratuité et son abondance. Cependant, l'intermittence de la production solaire demeure problématique et rend nécessaire l'utilisation d'un système de stockage pour adapter l'offre à la demande énergétique.

La méthode la plus couramment utilisée dans les centrales solaires thermodynamiques consiste à faire circuler un fluide caloporteur dans le champ de collecteurs solaires et d'ensuite transférer son énergie thermique à un matériau de stockage. La production d'électricité peut alors s'effectuer de façon différée en transférant l'énergie stockée dans le matériau à un fluide de travail utilisé dans un cycle thermodynamique. Le matériau de stockage peut être conservé dans une cuve unique utilisée aussi bien pour la charge que pour la décharge, ce qui permet une réduction conséquente du coût de stockage. Les zones chaude et froide sont en contact direct à l'intérieur de cette cuve unique (appelée thermocline) et il est attendu que la stratification thermique entre ces zones impacte les performances de stockage. C'est pourquoi la méthode de distribution du fluide caloporteur dans la cuve est étudiée afin de déterminer son influence sur la répartition thermique au sein de la cuve et sur le fonctionnement global du stockage.

Pour ce faire, une campagne expérimentale a été menée sur un prototype de centrale solaire du laboratoire PROMES-CNRS afin de comparer trois méthodes de distribution. La centrale MicroSol-R comprend trois collecteurs cylindro-paraboliques et une résistance électrique permettant de chauffer le fluide caloporteur lors de la charge, un stockage thermocline de 220 kWh et un générateur de vapeur pour la production en décharge.

Trois distributeurs ont été successivement placés en haut de la cuve afin de comparer différentes méthodes d'injection en charge et d'extraction en décharge : distribution uniforme du fluide sur la section de la cuve, distribution centrale et distribution périphérique.

Des cycles charge/décharge identiques ont d'abord été comparés entre les distributeurs afin d'isoler l'influence de celui-ci sur les performances. Une étude paramétrique a ensuite été réalisée sur l'influence du débit et de la température. La performance du stockage est évaluée au moyen du taux d'utilisation qui compare la variation d'enthalpie au cours d'une charge à la variation d'enthalpie maximale qui aurait été obtenue si le stockage avait été chargé jusqu'à la température haute. Un taux d'utilisation de décharge est défini de façon similaire.

Les expériences conduites ont permis de mettre en évidence l'influence de la distribution du fluide sur les performances d'un stockage de type thermocline. L'observation des profils de température radiaux montre que le système d'injection du fluide influence les transferts de chaleur et de masse au sein de la cuve. À l'échelle du procédé cependant, il a été montré qu'une amélioration de l'homogénéité radiale ne résulte pas nécessairement en un accroissement du taux d'utilisation et réciproquement. Le distributeur ne semble pas avoir d'influence significative sur le taux d'utilisation tandis que le débit et la température ont un impact en accord avec les prévisions numériques.

Troisième partie

Annexes

Liste des auteurs

A

Abdel Nour, Fadi	73
Abisset, Emmanuelle	58
Adelard, Laetitia	32, 89
Adihou, Yolaine	6
Admassu, Bimrew T.	8
Ahmed, Aftab	43
Ahopelto, Jouni	59
Ait-Oumeziane, Yacine	69
Akinlabi, Esther	89
Allheily, Vadim	31
André, Christophe	48
Andrich, Marine	80
Aouali, Abderezak	55
Arnaud, Pierre	13
Arregui, Guillermo	59
Awanto, Christophe	11

B

Badinier, Thibault	72
Bailly, Yannick	42
Barbosa, Séverine	54
Barriere, Thierry	42
Barry, Elhadj Boubacar	25, 33
Barthès, Magali	10, 47
Bastide, Alain	27, 30
Bataille, Françoise	21
Batsale, Jean-Christophe	55, 58
Baudin, Nicolas	15, 16
Beaumale, Marion	56
Béchet, Fabien	39
Bégot, Sylvie	8, 10, 18, 69, 83
Benabdesselam, Azzedine	17
Bendada, Larbi	81
Ben El Mekki, Ines	80
Berkane, Sonia	68
Billard, Etienne	84
Billaud, Yann	28
Blanco, Stéphane	57
Blidia, Abdelhamid	47
Boissiere, Benjamin	40
Boudéhenn, François	79

Bougeard, Daniel	48, 75
Bouia, Hassan	70
Boukhari, Nadir	39
Bouquerel, Mathias	70
Bourgès, Coline	53
Bouvenot, Jean-Baptiste	74
Bouvier, Pascale	48
Bouyer, Julien	36
Bouزيد, Sihem	68, 81
Bozonnet, Emmanuel	64
Braccio, Simone	9
Brima, Abdelhafid	68
Bulliard-Sauret, Odin	22

C

Caliot, Cyril	57
Capuj, Nestor E.	59
Carette, Michel	61
Castaing-Lasvignottes, Jean	32, 84, 89
Chamagne, Didier	24
Chavez-Angel, Emigdio	59
Chen, Pin	41
Chevalier, Stéphane	53, 55, 58
Chikhi, Nourdine	50
Chouder, Ryma	17
Chtioui, Feryal	64
Claverie, Rémy	36
Cocquet, Pierre-Henri	27
Colombano, Martin F.	59
Cressin, Maxime	39

D

Darbois-Textier, Baptiste	44
Darie, George	74
Daurelle, Jean-Vincent	45
David, Martin	21
Davoust, Laurent	50
De Labachellerie, Michel	10, 47
Delacourt, Eric	85
Delacroix, Jules	50
Delaleux, Fabien	13
De Larochembert, Thierry	42

Delaunay, Didier	51	Harel, Fabien	18
Dellali, Emna	83	Harmand, Souad	41
Delubac, Régis	12	Harnane, Yamina	68, 81
De Sauvage, Jean	72	Haugg, Albert Thomas	86
Désévaux, Philippe	69	Hebbir, Nacer	81
Dubas, Frédéric	4, 5, 42	Henry, Jean-François	31
Duguay, Christelle	60	Heyihin, Georges A.	11
Durastanti, Jean-Félix	13	Hirsinger, Laurent	42
E		Hoarau, Guillaume	84
El Hafi, Mouna	57	Houngan, Comlan Aristide	11
Escadeillas, Gilles	65	I	
Eustache, Julien	4, 42	Ismail, Ali	42
F		J	
Falcoz, Quentin	92	Jadal, Mariam	51
Fan, Yilin	15, 16	Joly, Frédéric	23, 40
Farges, Olivier	36, 57	Journeau, Christophe	50
Fasquelle, Thomas	54	Juhoor, Karim Khan	30
Feldheim, Véronique	75	K	
Ferrouillat, Sébastien	22	Kadoch, Benjamin	54, 67
Fourmond, Vincent	45	Kallio, Sonja	78
Fournier, Richard	57	Kane, Malick	6
Frappé, Mathieu	71	Kang, Changwoo	25, 33
Fuentes, Adrien	66	Kohse, Gordon	61
G		Kovchar, Jean	47
Gadaud, Pascal	28	Kuznik, Frédéric	70
Gallego, Sandra	65	Kziazzyk, Théo	24
Gambade, Julien	7	L	
Gardarein, Jean-Laurent	54, 60	Labergue, Alexandre	88
Garnier, Bertrand	20, 26	Lanzetta, François	8, 10, 11, 44, 47, 83
Gaspar, Jonathan	54	Lapertot, Arnaud	67
Gaume, Benjamin	23, 40	Laribi, Afef	69
Gavignet, Eric	24	Lavieille, Pascal	56, 91
Getie, Muluken	8, 10	Le Cocq, Thomas	84
Ghazal, Ghassan	40	Le Maout, Yannick	38
Gilblas, Rémi	38	Le Metayer, Olivier	67
Ginestet, Stéphane	65	Le Niliot, Christophe	54
Girardot, Laurent	42	Le Pierrès, Nolwenn	9, 82
Giraud, Florine	80, 90	Lepiller, Valérie	18, 69
Giurgea, Stefan	42	Le Roux, Diane	14
Glantz, Tony	88	Le Roux, Galo	46
Glises, Raynal	4, 42	Letessier, Jordan	60
Glouannec, Patrick	7, 66	Lethuillier, Jérémie	91
Gondrexon, Nicolas	22	Liemans, Benoit	75
Gradeck, Michel	88	Li, Tianjiao	42
Griol, Amadeu	59	Lochegnies, Dominique	39
Groz, Marie-Marthe	58	Lou, Wanruo	16
Guillet, Gabriel	54	Luna Valencia, Juan Esteban	88
Guillou, Paul	89	Luo, Lingai	15, 16
H		Lyoussi, Abdallah	61
Hadj Ahmed, Asmaa	45		

M

Machard, Anaïs	64
Madyira, Daniel	89
Mahaman Laouali Souley, Youssoufou	32
Mahamoudou, Arnat	82
Maillet, Denis	52
Maire, Jérémie	59
Maksassi, Ziad	26
Malagoni, Marina	65
Mameri, Fateh	85
Mangi, Fareed Hussain	43
Mantaropoulos, Patric	90
Marc, Olivier	84, 89
Marti, David	27
Martinez, Alejandro	59
Martin, Jean-François	84
Masson, Renaud	60
Menanteau, Sébastien	73
Merlat, Lionel	31
Meunier, Alexandre	42
Milhet, Xavier	28
Miscevic, Marc	56, 91
Mishra, Ketaki	20
Mora, Laurent	71
Moreau, Florian	29
Moreau, Philippe	39
Morin, Céline	85
Mutabazi, Innocent	25, 33

N

Naceur, Hakim	39
Navarro-Urrios, Daniel	59
Neveu, Pierre	14, 92
Noël, Hervé	7, 66

O

Obrecht, Christian	70
Olaya G., Rodrigo A.	20
Olivès, Régis	14, 37
Ouenzerfi, Safouene	41
Ouhimd, Mustapha	70
Ould El Moctar, Ahmed	26
Ouzzine, Badr	72

P

Parent, Gilles	36
Penazzi, Léa	57
Perlot-Bascoules, Céline	32
Perrin, Mickaël	42
Phan, Hai Trieu	9, 79
Philippe, Baucour	24
Picgirard, Fabien	84
Piluso, Pascal	50

Pizzo, Yannick	54
Plait, Antony	4, 5, 42
Poncet, Christophe	22
Pradere, Christophe	55
Pradère, Christophe	53, 58

Q

Quemener, Olivier	23, 40
-------------------	--------

R

Ramalingom, Delphine	27
Ramel, David	42
Ramousse, Julien	6, 82
Randrianalisoa, Jaona	31
Rauch, Jean-Yves	83
Rémy, Benjamin	52
Reneaume, Jean-Michel	12, 46
Repetto, Georges	88
Retailleau, Florent	31
Reynard-Carette, Christelle	61
Riahi, Ali	41
Rigollet, Fabrice	54, 60
Rime, Simon	6
Romary, Raphaël	41
Rongier, Clément	38
Rouizi, Yassine	23
Roy, Jean-Claude	42
Russeil, Serge	48, 75

S

Saidouni, Wafa Hafsa	18
Saint Laurent, Claire	13
Salagnac, Patrick	64
Sans, Jean-Louis	50
Sans, Morgan	57
Saury, Didier	28, 29
Schiffler, Jesse	85
Schmidt, Fabrice	38
Schoefs, Franck	26
Sempey, Alain	71
Serra, Sylvain	12, 46
Serre, Lilian	30
Sghuri, Anas	28
Shamsborhan, Hiva	73
Signor, Loïc	28
Siroux, Monica	74, 78
Sochard, Sabine	12, 46
Sommier, Alain	53, 55, 58
Soto, Jérôme	15, 16, 51
Sotomayor-Torres, Clivia	59
Souyri, Bernard	6
Stouffs, Pascal	17
Stutz, Benoit	79

Szymkiewicz, Fabien 72

T

Tadrist, Loïc 44

Tadrist, Lounès 44

Tauveron, Nicolas 9

Tobaly, Pascal 80, 90

Topin, Frédéric 91

Toutant, Adrien 21

Touzo, Aubin 37

Tréméac, Brice 80, 90

Turquais, Benjamin 50

U

Ullah, Zia 43

Untrau, Alix 46

V

V.S Oliveira, Arthur 88

Vannerem, Ségolène 92

Vanson, Jean-Mathieu 60

Varrall, Kévin 30

Vauquelin, Olivier 30

Velu, Gabriel 41

Vicente, Jerome 45

Vignal, Laure 22

Villemin, Thomas 36

Viot, Hugo 71

Volte, Adrien 61

Voronca, Stefan-Dominic 74

W

Wagner, Marc 80

Weppe, Alexandre 29

Wirtz, Mathilde 79

X

Xie, Baoshan 15, 16

Y

Yahiat, Ferial 48

Yoshikawa, Harunori 25, 33

Youssef, Benjamine 32

Z

Zacharie, Célien 52

Zanatta, Luca 13