

THERMIQUE, ÉNERGIES RENOUVELABLES ET TERRITOIRES

NOLWENN LE PIERRES
CHRISTOPHE MENEZO

RECUEIL DES RÉSUMÉS

DU

CONGRÈS ANNUEL DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE

SFT 2025

3 – 6 JUIN 2025
CHAMBÉRY

ORGANISÉ PAR

LOCIE (UMR 5271 - UNIVERSITÉ SAVOIE MONT-BLANC)

AVEC LE SOUTIEN DE L'INSTITUT LITEN DU CEA
À L'INSTITUT NATIONAL DE L'ÉNERGIE SOLAIRE (INES)

Partie I

Introduction

Parrainages

Le Congrès Français de Thermique, SFT 2025, organisé par le LOCIE (UMR5271, CNRS-Université Savoie Mont-Blanc) avec le soutien de l'institut LITEN du CEA à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) a bénéficié du parrainage et du soutien financier des institutions et des organismes suivants :

Laboratoire procédés énergie bâtiment (UMR 5271)

Université Savoie Mont Blanc, bât. Helios
60 av. du lac Léman, Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac

<https://www.univ-smb.fr/locie/>



Université Savoie Mont Blanc

27 rue Marcoz
73000 Chambéry

<https://www.univ-smb.fr/>



Polytech Annecy-Chambéry

5 chemin Bellevue
74940 Annecy

<https://www.univ-smb.fr/polytech/>



CEA Liten

17 Avenue des Martyrs
38000 Grenoble

<https://liten.cea.fr/cea-tech/liten>



Ce congrès a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence (ANR-18-EURE-0016 – Solar Academy).

Cette manifestation est financée par la Région Auvergne Rhône Alpes.

Graduate school Solar Academy

Université Savoie Mont Blanc, bât. Helios
60 av. du lac Léman, Savoie Technolac 73370 Le
Bourget du Lac

<https://www.univ-smb.fr/solaracademy/>



Région Auvergne-Rhône-Alpes

101 cours Charlemagne
CS 20033
69269 Lyon Cedex 02

<https://www.auvergnerhonealpes.fr/>



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

THEMACS Ingénierie

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

themacs-engineering.com

Contact: Jean-Pierre MONCHAU

☎ 06 29 82 44 34

✉ monchau@themacs.fr



LaVision GmbH

Anna-Vandenhoeck-Ring 19
37081 Göttingen, Germany

<https://www.lavision.de/fr/>

Contact: Cédric DEGOUET

✉ infofrance@lavision.com



COMSOL France

26 rue Gustave Eiffel
38000 Grenoble, France

www.comsol.com

Contact: Frédéric BERNARD

☎ 04 76 46 49 01

✉ frederic.bernard@comsol.fr



DEWESoft

14 rue René Cassin
91300 Massy

dewesoft.com

Contact: Fabien JEANDENANS

✉ fabien.jeandenans@dewesoft.com



Alt-R&D

CoAction
46-48 rue Ferdinand Buisson
33130 BEGLES

<https://www.alt-rd.com/>

Contact: Emmanuel RUFFIO

✉ emmanuel.ruffio@alt-rd.com



Comité d'organisation

Équipe locale

Le 33ème Congrès Français de Thermique est organisé par le Laboratoire procédés énergie bâtiment, LOCIE, avec le soutien de l'institut LITEN du CEA à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). Le LOCIE, unité mixte de recherche, a pour tutelles l'Université Savoie Mont Blanc et le CNRS.

Le congrès s'est tenu à Chambéry du 3 au 6 juin 2025 sur le thème **Thermique, Énergies renouvelables et Territoires**.

Présidence : Nolwenn LE PIERRÈS et Christophe MÉNÉZO

Secrétariat scientifique : Simon ROUCHIER et Julien RAMOUSSE

Comité d'organisation local : Hervé BOILEAU, Catherine BUHÉ, Gilles FRAISSE, Florine GIRAUD, Nolwenn LE PIERRÈS, Antoine LECONTE, Guillaume LE GALL, Anna LUSHNIKOVA, Christophe MÉNÉZO, Mickaël PAILHA, Hai Trieu PHAN, Van-Kha PHAM, Julien RAMOUSSE, Simon ROUCHIER, Christian RUYER-QUIL, Benoît STUTZ, Martin THEBAULT, Monika WOLOSZYN, Etienne WURTZ

Comité Scientifique de la SFT

Jean-Luc BATTAGLIA	I2M, Bordeaux	Jérôme BELLETTRE	LTEN, Nantes
Philippe BAUCOUR	FEMTO, Belfort	Fabien DELALEUX	CERTES, Sénart
Stéphane CHEVALIER	I2M, Bordeaux	David DONJAT	ONERA, Toulouse
Bernard DESMET	ENSIAME, Valenciennes	Christophe JOURNEAU	CEA, Cadarache
Marie-Christine DULUC	CNAM, Paris	Marjolaine LEGAY	Ariane Group
Najib LARAQI	LTIE, Ville d'Avray	Damien MERESSE	LAMIH, Valenciennes
Jian LIN	Icube, Strasbourg	Thomas PIERRE	IRDL, Lorient
Johann MEULEMANS	Saint Gobain, Paris	Christophe RODIET	ITheMM, Reims
Joana RANDRIANALISOA	ITheMM, Reims	Patrick SALAGNAC	LASIE, La Rochelle
Romuald RULLIERE	CETHIL, Lyon	Sylvain SERRA	LATEP, Pau
Didier SAURY	Pprime, Poitiers		

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.

Aouali Abderezak	Vincent Ayel	Jean-Luc Bailleul
Francoise Bataille	Jean-Luc Battaglia	Philippe Baucour
Nicolas Baudin	Jean-Pierre Bedecarrats	Jérôme Bellettre
André Bergeron	Pascal Le Bideau	Nicolas Blet
Jean Luc Bodnar	Dimitri Bonnet	Daniel Bougeard
Pascal Boulet	Pascale Bouvier	Charles Brissot
Cyril Caliot	Guillaume Castanet	Cathy Castelain
Didier Chamagne	Stéphane Chevalier	Romain Collignon
Steven Le Corre	José Lara Cruz	Louis Decoster
Jules Delacroix	Fabien Delaleux	Didier Delaunay
Sébastien Denis	Philippe Desevaux	Bernard Desmet
Ayihaou Armand Djossou	David Donjat	Marie-Christine Duluc
Jean Pierre Dumas	Olivier Farges	Matthieu Fenot
Stéphane Fohanno	Bertrand Garnier	Jonathan Gaspar
Edouard Geslain	Stéphane Gibout	Rémi Gilblas
Florine Giraud	Michel Gradeck	Philippe Haberschill
Jean-Luc Harion	Christophe Journeau	Abdelhamid Kheiri
Matthieu Labat	Mohammed Lachi	François Lanzetta
Thierry De Laroche Lambert	Damien Lecointe	Thierry Lemenand
Denis Lemonnier	Renan Leon	Laurent Libessart
Franck Lucas	Anna Lushnikova	Alexandre Marie
Johann Meulemans	Pierre Millan	Ahmed Ould El Moctar
Christophe Ménézo	Kokouvi Edem N'Tsoukpoe	Xavier Nicolas
Hai Trieu Phan	Thomas Pierre	Thomas Pierre
Nolwenn Le Pierrès	Hugues Pretrel	Hervé Pron
Julien Ramousse	Jaona Randrianalisoa	Jean-Michel Reneaume
Philippe Reulet	Fabrice Rigollet	François Rioual
Christophe Rodiet	Auline Rodler	Simon Rouchier
Yassine Rouizi	Jean-Louis Roujean	Stéphane Roux
Jean-Claude Roy	Romuald Rulliere	Serge Russeil
Christian Ruyer-Quil	Patrick Salagnac	Didier Saury
Jean-Paul Serin	Sylvain Serra	Jérôme Soto
Pascal Stouffs	Benoit Stutz	Lounès Tadriss
Konstantinos Termentzidis	Martin Thebault	Karim Touati
Nathalie Trannoy	Marielle Varenne-Pellegrini	Gerard Vignoles

Le mot du comité d'organisation

La Société Française de Thermique a pour objectif le développement et le rayonnement des sciences thermiques et énergétiques et de leurs applications concrètes. Cette année 2025, le 33ème Congrès Français de Thermique se déroule du 3 au 6 juin 2025 à Chambéry sur le thème **Thermique, Energies renouvelables et Territoires**.

En 2023, l'Union Européenne a fixé comme objectif en matière d'énergie d'atteindre une part de 42,5 % d'énergies renouvelables d'ici 2030, pour viser la neutralité carbone d'ici 2050. En France, la loi d'accélération de la production d'énergies renouvelables de mars 2023 invite les collectivités territoriales à identifier les zones à fort potentiel d'énergies renouvelables sur leur territoire, soulignant ainsi la nécessité d'évaluer leur potentiel au niveau local. Les différents territoires possèdent diverses ressources énergétiques renouvelables dont les gisements sont propres aux spécificités de chacun : éolien, géothermique, hydrothermique, biomasse ou solaire. Pour cette édition du congrès de la SFT, nous souhaitons mettre en avant la thermique non seulement en tant que vecteur de génération d'énergie, mais jouant également un rôle déterminant sur la performance des systèmes énergétiques, leur vieillissement et la valorisation des énergies renouvelables à l'échelle des territoires.

Pour faire face en enjeux des dérèglements climatiques, des instabilités géopolitiques et des disparités sociétales ces territoires aux spécificités si différentes doivent pouvoir s'appuyer sur des systèmes énergétiques résilients capable de s'adapter à l'évolution des besoins et d'assurer une sécurisation et une souveraineté énergétique. Dans ce contexte de mutation énergétique les énergies renouvelables ont un rôle majeur à jouer en réponse aux besoins locaux et la thermique est indéniablement une thématique centrale à chaque étapes de leurs transformations : production (de chaleur, de vapeur, combustion, photoconversion, . . .), stockage, distribution et utilisation pour les bâtiments, l'industrie et l'agriculture, l'efficacité en régissant les conditions opérantes, le pilotage et l'intégration des systèmes de cogénération ou de trigénération, le transport d'énergies au sein de réseaux de 5ème génération. . . Ce congrès est l'occasion de réunir autour de ces enjeux et des problématiques qu'ils induisent la communauté des thermiciens et des énergéticiens issus aussi bien du monde académique que de la sphère industrielle.

Le thème du congrès Thermique, Energies renouvelables et Territoires sera tout particulièrement abordé dans les sept conférences plénières qui permettront de poser un état des lieux de nos connaissances, et d'apporter des pistes de réflexion sur les actions à mener :

- M. Daniel Mugnier (Directeur Délégué de PLANAIR et Chairman IEA PVPS TCP à l'Agence Internationale de l'Energie) interviendra sur le Solaire PV : agilité technologique face à la transition énergétique.
- M. Damien Bouvier (Maître de conférences en droit européen au Centre de Recherche en Droit Antoine Favre) et Mme Catherine Banet (Professeure de droit spécialisée en droit de l'énergie à l'Université d'Oslo) présenteront Droit, planification et système énergétique : exemple de la géothermie.
- M. Jean François Fourmigué (Chercheur au LITEN, CEA) abordera l'Efficacité énergétique pour l'industrie et les territoires.

- M. Fabrice Malla (responsable aux Services industriels de Genève (SIG)) interviendra sur l'hydrothermie en présentant GeniLac : Fraîcheur et efficacité énergétique au cœur du canton de Genève.
- M. Philippe Papillon (docteur-ingénieur indépendant) présentera les enjeux et avancées technologiques du solaire thermique.
- Mme Florence Magnin (Chargée de recherche CNRS à EDYTEM) interviendra sur les impacts des changements climatiques, en particulier l'évolution du permafrost et son implication pour les sociétés alpines.
- Mme Marjorie Musy (Directrice de recherche au Cerema) présentera les avancées et enjeux de la modélisation microclimatique pour la thermique des quartiers.

Des ateliers ont également été programmés en lien avec les Groupes Thématiques de la SFT pour promouvoir des échanges autour de thèmes transversaux comme par exemple :

- Simulation et modélisation thermique pour les EnR
- Thermique et agroalimentaire.
- Thermique et milieux poreux.
- Thermique et IA.

Lors de ce congrès, 108 communications ont été acceptées pour publication dans les actes du congrès, ainsi que 78 communications présentées sous forme d'affiche uniquement, soit un total de 186 posters dans tous les domaines de la thermique. Le Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique a classé 6 communications pour le prix Biot-Fourier qui seront proposées pour publication dans la revue Entropie : thermodynamique-énergie-environnement-économie (ISTE).

Enfin, le comité d'organisation du congrès tient à remercier très sincèrement le Conseil d'Administration et le Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique, ainsi que nos prédécesseurs dans l'organisation de ce congrès annuel, pour nous avoir conseillés et aidés dans l'organisation de ce 33e congrès.

L'ensemble du comité local d'organisation est très heureux de vous accueillir à Chambéry et vous souhaite, à toutes et à tous, un excellent congrès 2025 !

Nolwenn LE PIERRES, Christophe MENEZO
et l'ensemble du comité d'organisation local

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.

Quantification de l'impact de la résistance thermique de contact entre fibres sur la conduction dans les matériaux d'isolation fibreux

Clémence Gaunand^{1,2,3*}, Yannick De Wilde¹, Valentina Krachmalnicoff¹, Adrien François², Veneta Grigorova-Moutiers², Karl Joulain³

* ✉: clemence.gaunand@espci.fr

¹ Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 1 rue Jussieu, 75238 Paris Cedex 05 (France)

² Saint-Gobain Research Paris, 41 quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers Cedex (France)

³ Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, 11 Boulevard Marie et Pierre Curie, 86073 Poitiers Cedex 9 (France)

Mots clés : Matériaux d'isolation fibreux ; Conduction ; Résistance thermique de contact ; Thermographie infrarouge ; Simulation numérique ; Conductivité solide

(Cf. page [73](#))

Modélisation du déclenchement de l'ébullition nucléée en convection forcée en régimes permanent et transitoire

Héloïse Hénaff^{1,2*}, Jean-Marc Labit², Cassiano Tecchio², Marie-Christine Duluc

* ✉: heloise.henaff@cea.fr

¹ Conservatoire National des Arts et Métiers, LAFSET, 75003, Paris, France

² CEA, STMF, 91191, Gif-sur-Yvette, France

Mots clés : Transitoire de puissance ; Déclenchement de l'ébullition nucléée ; Convection forcée

(Cf. page [199](#))

Influence du rayonnement sur un écoulement de convection naturelle turbulent en cavité différentiellement chauffée

Vincent Daurenjou^{1*}, Florian Moreau¹, Didier Saury¹

* ✉: vincent.daurenjou@ensma.fr

¹ Institut Pprime, UPR 3346 CNRS - ENSMA - Université de Poitiers Téléport 2, 1 Avenue Clément Ader, BP40109, F-86961 Futuroscope Cedex, France

Mots clés : Convection naturelle ; Rayonnement ; Turbulence

(Cf. page [82](#))

Mesure de température dans des milieux semi-transparents par imagerie photothermique hétérodyne en transmission

Jordan Letessier^{1,2*}, Jérémie Maire^{1,2}, Stéphane Chevalier^{1,2}

* ✉: jordan.letessier@u-bordeaux.fr

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

Mots clés : Thermographie; Spectroscopie; Coefficient de thermotransmittance; Imagerie photothermique hétérodyne; Transmission; Infrarouge; Modélisation; Microfluidique

(Cf. page [74](#))

Étude expérimentale du comportement des feux de nappe et du risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans une chambre à échelle réduite du château de Chambord

Ziyuan Chen^{1,*}, Brady Manescau¹, Khaled Chetehouna¹, Ilyas Sellami¹, Ludovic Lamoot¹

* ✉: ziyuan.chen@insa-cvl.fr

¹ INSA Centre-Val de Loire, Université en orléans, PRISME UR 4229, 88, boulevard Lahitolle, 18000 Bourges, France

Mots clés : Feu de nappe; Comportement du feu; Sécurité incendie; Confinement; Bâtiments historiques; combustion oscillatoire basse fréquence

(Cf. page [86](#))

Utilizing Local Climate Zone Data for Land Use Representation in Weather Research and Forecasting (WRF) Models

Hamza Nisar^{1,2,*}, Christophe Ménézo¹, Mattheos Santamouris²

* ✉: hamza.nisar@univ-smb.fr

¹ Laboratoire LOCIE UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc – CNRS (France)

² School Built Environment, University New South Wales (Sydney)

Mots clés : Urban Heat Island, Solar PV, WRF model

(Cf. page [142](#))

Table des matières

I Introduction	iii
Parrainages	v
Comité d'organisation	ix
Liste des relecteurs	xi
Le mot du comité d'organisation	xiii
Prix Biot-Fourier	xv
Quantification de l'impact de la résistance thermique de contact entre fibres sur la conduction dans les matériaux d'isolation fibreux	xv
Modélisation du déclenchement de l'ébullition nucléée en convection forcée en régimes permanent et transitoire	xv
Influence du rayonnement sur un écoulement de convection naturelle turbulent en cavité différentiellement chauffée	xvi
Mesure de température dans des milieux semi-transparents par imagerie photothermique hétérodyne en transmission	xvi
Étude expérimentale du comportement des feux de nappe et du risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans une chambre à échelle réduite du château de Chambord	xvii
Utilizing Local Climate Zone Data for Land Use Representation in Weather Research and Forecasting (WRF) Models	xvii
Table des matières	xvii
II Résumé des communications	1
1 Energétique	3
Towards low energy, low tech and low cost DHW production for buidlings	6
Optimal design of geothermal rain water tank for passive cooling buildings	7
Etude du transfert hydro-thermique du système géothermique : Mesure de la diffusivité isotherme de l'humidité des sols	8
Performance d'un moteur Ericsson à iso-volumes de compression et de détente selon différentes lois de commande des soupapes	9

Impact des choix structurels des Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI) sur le bilan et l'efficacité des transitions énergie-climat locales	10
Impact de l'évaporation de l'eau sur la caractérisation des propriétés intrinsèques d'un substrat capillaire	11
Étude de la production hybride de froid combinant une machine de froid solaire par sorption et une machine à compression de vapeur	12
Flexibilité des systèmes multi-énergétiques : État de l'art, définition et leviers	13
Étude expérimentale de la condensation de vapeur d'eau en écoulement vertical descendant au sein d'un mini canal	14
Optimisation du refroidissement par évaporation directe basée sur des matériaux organiques dans un climat méditerranéen	15
Production d'eau chaude sanitaire : chauffe-eau thermodynamique vs chauffe-eau solaire	16
Modélisation des transferts de chaleur au sein d'un film ruisselant	17
Green Hydrogen as an Energy Vector for Mobility and Residential buildings needs in Urban Areas	18
Multi-Objective Optimization of Photovoltaic (PV) Integration in Residential Buildings	19
Étude théorique et numérique de batteries de Carnot novatrices	20
Disponibilité industrielle des AHT pour la production de vapeur surchauffée par valorisation de chaleur fatale	21
Experimental analysis of the refrigerant two-phase flow in an absorption chiller based on GAX cycle	22
Expérimentation d'un prototype à absorption fonctionnant avec le couple $\text{LiNO}_3/\text{NH}_3$. . .	23
Enquête sur l'état actuel des chauffe-eau solaires à tubes sous-vide directs au Burkina Faso : enseignements tirés et recommandations pour une plus grande adoption . . .	24
Stockage thermique durable pour le Sahel : étude des propriétés de stockage à température ambiante des huiles de Lannea pour la technologie solaire à concentration	25
Caractérisation énergétique d'une cuisine solaire pour un restaurant	26
Récupération de chaleur industrielle par humidification	27
"toscana" - TerritOrial Solar Cadastre modeling and ANALysis - Un outils en accès libre pour évaluer le potentiel solaire des territoires	28
Modèle 1D-1D de condenseur avec le code CATHARE-3 pour la simulation à l'échelle système de cycles de Rankine	29
Outil d'aide à la décision pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle : Vers une industrie plus éco-efficace et résiliente	30
Etude numérique de l'influence de l'assistance par compresseur dans le cycle Absorption Heat Transformer pour valoriser des sources de chaleur fatales à basse température	31
Optimisation par Algorithme Génétique de la Performance Énergétique et du Confort Thermique d'un Système de Climatisation par Eau de Mer (SWAC)	32
Méthodologie de classification des bâtiments à l'échelle du quartier au regard de leur potentiel de flexibilité énergétique	33
Simulation d'une installation solaire aérovoltaïque sur un bâtiment non résidentiel existant via TRNSYS	34

Analyse exergo-économique de cycles thermodynamiques pour la réfrigération de moyenne puissance	35
Méthodologie de comparaison des pilotages conventionnel et par apprentissage profond en sous-station de réseaux de chaleur urbains	36
Stockage thermique pour le couplage entre récupération de chaleur fatale et production d'hydrogène dans un électrolyseur à oxyde solide : étude énergétique et technico-économique	37
Analyse numérique de la performance des panneaux photovoltaïques flottant et impact thermiques et énergétiques des facteurs environnementaux	38
Approche par cosimulation pour l'optimisation en temps réel du pilotage d'une centrale solaire existante	39
Analyse de cycle de vie d'un puits canadien : évaluation environnementale des systèmes pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments	40
Les stockages distribués pour diminuer la température d'opération des réseaux de chaleur existants	41
Simulation numérique du Stirling GPU3 avec gestion améliorée des sauts de section	42
Etude expérimentale et numérique d'un capteur solaire à tubes sous vide avec stockage intégrant un échangeur	43
Optimisation multiobjectif de la cuisson d'un produit céréalier	44
Analyse topologique des réseaux de chaleur nationaux	45
Développement de schémas RC comme outil de cartographie pour les besoins en chaud et en froid à l'échelle du bâtiment	46
Sobriété énergétique et optimisation intégrée des stratégies de rénovation et de gestion des bâtiments de bureaux en France : impacts énergétiques, économiques et environnementaux	47
Dimensionnement optimal de systèmes énergétiques solaires hybrides produisant de la chaleur et de l'électricité pour les procédés industriels	48
Étude numérique de l'intensification des échanges thermiques dans un stockage de chaleur latent par l'usage combiné de graphite naturel expansé compressé, ailettes et mélangeurs statiques	49
Conception d'un foyer de cuisson simple paroi amélioré utilisé au Bénin	50
Refroidissement direct d'Electronique de Puissance par l'utilisation de matériaux à changement de phase	51
Modélisation et optimisation d'un système multi-énergies pour le chauffage urbain	52
Modélisation d'une chaudière de récupération avec changement de phase et calcul du coefficient d'échange	53
Approche par cosimulation pour l'optimisation en temps réel du pilotage d'une centrale solaire existante	54
Analyses thermodynamiques statiques de cycles thermochimiques hybrides à éjecteur pour la valorisation en froid de chaleur basse température	55
Pilotage expérimental de la demande d'un bâtiment relié à un réseau de chaleur	56
Récepteurs solaires à lit fluidisé : analyse thermo-mécanique d'un tube absorbeur en carbure de silicium	57

Modélisation d'une géométrie spirale pour application de batterie	58
Prototypage d'une Pompe à Chaleur Haute Température pour utilisation dans les Batteries Carnot Intégrées Thermiquement	59
Modélisation dynamique d'un stockage souterrain à faible profondeur pour valoriser l'énergie solaire	60
SLiding Contact Investigation for Carbon Pantograph wear Evaluation (SLICE)	61
Optimisation énergétique des systèmes de climatisation centralisée à eau glacée dans les bâtiments tertiaires en milieu tropical humide	62
2 Hautes Températures - hauts flux	63
Conception, mise en œuvre et caractérisation d'un simulateur solaire à haute densité de flux d'une puissance de 45 kWel	64
Développement d'un dispositif expérimental pour la mesure de l'émissivité normale spectrale d'une céramique de CeO ₂ en conditions de thermochimie solaire	65
Simulation numérique du soudage par point : caractérisation et modélisation des résistances de contact	66
Modèle spectral EDQNM pour les écoulements turbulents fortement anisothermes en convection forcée	67
3 Micro et Nanothermique	69
Modèle théorique et analyse physique de la résistance thermique d'une interface liquide- vapeur	70
Caractérisation thermique de couches mince par thermoréfectance (TDTR) et radiométrie photothermique modulée	71
Numerical Simulation of Radiative Cooling Material Performanc Under Diverse Climatic Conditions	72
Quantification de l'impact de la résistance thermique de contact ente fibres sur la conduction dans les matériaux d'isolation fibreux	73
Mesure de température dans des milieux semi-transparents par imagerie photothermique hétérodyne en transmission	74
Transport de gaz en milieux poreux engendré par un gradient de température	75
4 Modes de Transfert	77
Etude expérimentale des transferts de chaleur et de masse dans un système de dessalement solaire par humidification-déshumidification	79
Conception d'un spreader thermique à haute isolation électrique et immunité CEM	80
Influence du profil d'injection sur les transferts thermiques dus à l'impact d'un jet liquide à haut nombre de Prandtl	81
Etude expérimentale de l'influence du rayonnement sur la dynamique d'un écoulement turbulent de convection naturelle en cavité différentiellement chauffée	82
Caractérisation des performances thermo-hydrauliques de fluides caloporteurs en régimes de convection forcée et mixte dans un écoulement interne	83
Étude de la convection naturelle transitoire d'un fluide de Bingham à grande thermodépendance en viscosité	84

Etude expérimental de l'ébullition se produisant dans un film d'eau tombant sur une plaque verticale plane rainurée à des pressions proches du proche du point triple	85
Étude expérimentale du comportement des feux de nappe et du risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans une chambre à échelle réduite du château de Chambord	86
Influence de la circulation à grande échelle sur le transfert de chaleur en convection turbulente rugueuse	87
Un coefficient de chaleur peut-il être intrinsèque pour une configuration de convection forcée donnée ?	88
Transferts thermiques dans les matériaux granulaires à faible conductivité thermique : vers un échange de chaleur efficace pour les applications agro-alimentaires	89
Modélisation du couplage conducto-convecto-radiatif à l'échelle continue en vue de l'optimisation topologique d'absorbeurs solaires volumiques	90
Simulation par la méthode de Monte Carlo en espace de chemins du couplage conducto-radiatif : Application à la Gyroïde	91
Etude des mécanismes de conversion électrothermique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage	92
Étude expérimentale du refroidissement par impact de jet d'huile : influence de la courbure de surface	93
Analyse expérimentale de l'influence de la géométrie de la surface d'un solide sur son ablation par un jet de liquide	94
Étude numérique et expérimentale de l'évaporation de multi-gouttes sessiles : Influence de l'effet d'écran sur la dynamique d'évaporation	95
Étude d'un module de stockage thermique réversible pour réseaux urbains de chaud et de froid	96
Analyse de l'efficacité de mélange : Nanofluides vs. suspensions complexes	97
Étude de l'ébullition confinée de l'eau à basse pression pour les performances d'un échangeur de chaleur et de masse	98

5 Modélisation et Simulation Numérique 99

Contribution of multiphysics CFD simulation to the reduction of pollutant emissions from domestic heating appliances: application to a pellet stove	100
Thermal Analysis of Multilayered Building Walls Using the Thermal Quadrupole Method: Transfer Functions, Convolution-Based Predictions, and Multispot Excitation Scenarios	101
Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine à gaz classique : Analyse des performances de combustion et impact de la vapeur d'eau sur les émissions polluantes	102
Optimisation des Aéroréfrigérants dans les Usines de GNL : Amélioration des Performances par Aspersions Directes d'Eau	103
Étude numérique de l'intensification des échanges dans un absorbeur de capteur solaire .	104
Simulation numérique 3D et optimisation de l'intensification des échanges thermofluidiques d'un microcanal d'échangeur thermique par micro-structuration des surfaces d'échange	105
Fine characterisation of the solar resource variability in intricate urban environments by means of higher-order modal decomposition	106

Modélisation nodale d'un transformateurs de traction électriques ferroviaire	107
Modélisation FEM multi-échelle du transfert thermique lors du processus AFP in-situ sur des composites thermoplastiques	108
Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans une centrale photovoltaïque flottante : utilisation de la méthode des frontières immergées	109
Etude de la convection naturelle turbulente dans un bain liquide élargé et chauffé en volume	110
Thermique par Monte-Carlo : modèles pour l'anisotropie et le rayonnement dans un milieu chauffant	111
Modélisation dynamique et optimisation d'un stockage thermique par adsorption	112
Study of an Axial Micro-Turbine with 1D Model Including Various Fluids or Zeotropic Mixtures and Validated against Experimental Results	113
Impact des conditions d'entrées sur la formation de la thermocline dans le système dual média	114
Vers une meilleure modélisation des MOFs pour les machines à adsorption à basse température	115
6 Métrologie et Techniques Inverses	117
Caractérisation des propriétés thermiques d'un matériau composite thermoplastique	118
Optimizing climate data integration for thermal properties characterization in building walls: A comparative investigation of fitting techniques and inversion algorithms using thermal quadrupoles	119
A novel parametric spectral technique to solve inverse heat problems for the estimation of wall thermophysical properties	120
Caractérisation de matériaux à changement de phase solide-liquide par bilan entropique .	121
Utilisation de modèles analytiques pour les procédés de thermoablation	122
Estimation of the heat flux imposed by a diode-laser on a paste	123
Estimation of infrared detector bandwidths and effect on the Pulsed Periodic Photothermal Radiometry performance	124
Pour une estimation simultanée des conductivités de matériaux orthotropes par thermographie	125
Caractérisation thermo-physique d'un matériau à changement de phase avec surfusion incluant l'évaluation du flux dissipé lors de la phase de recalescence	126
Imagerie thermique super résolue par méthode de Compressive Sensing	127
Développement d'une méthode Fluxmétrique avec prise en compte des pertes latérales pour l'estimation de conductivités thermiques	128
Mesure thermo-rhéologique des écoulements polymères : avancées scientifiques et application aux procédés d'injection	129
Estimation tridimensionnelle de densité de flux de chaleur par méthode séquentielle de spécification de fonction avec régularisation	130
Identification de la conductivité thermique d'un composite à matrice thermodurcissable en cours de réticulation	131
Experiment-based Reduced Order Model by MIM applied to empty beehives for temperature prediction	132

Identification de la thermo-dépendance de la conductivité de matériaux isolants par modèles réduits modaux	133
Validation d'une instrumentation low-cost pour l'étude d'un générateur d'eau atmosphérique	134
Développement d'une méthode flash face avant pour l'étude thermique des dépôts de surface des composants en contact avec le plasma dans les tokamaks	135
7 Thermique Atmosphérique et Adaptation au Changement Climatique	137
Assessing the Impact of Photovoltaic Systems on Urban Microclimate and Building Energy Demand	138
Résilience thermique dans les écoles – Revue bibliographique des solutions d'adaptation aux vagues de chaleur	139
Thermal Comfort Analysis and Occupant Adaptation in Office Buildings of Burkina Faso: A Field Study	140
Résilience aux vagues de chaleur d'un système de rafraîchissement adiabatique indirect destiné aux bâtiments tertiaires	141
Utilizing Local Climate Zone Data for Land Use Representation in Weather Research and Forecasting (WRF) Models	142
Numerical Simulation of Radiative Cooling Material Performance: BaSO ₄ /PVDF-HFP Composites Under Diverse Climatic Conditions	143
Inter-comparaison d'outils de simulation du microclimat urbain et confrontation à de la mesure	144
Optimisation et valorisation des matériaux locaux de la région de Tiznit pour une meilleure performance thermique dans le cadre de l'Éco-construction	145
Impact de la nature des matériaux utilisés dans l'enveloppe des bâtiments, sur la consommation énergétique et le confort thermique en climat chaud et sec	146
Impact des variations saisonnières et du microclimat local sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur : Cas d'un bâtiment résidentiel à Nantes, France	147
Developing a model for Urban Environment based on transient RANS approach	148
8 Thermique appliquée	149
Experimental and numerical analysis of shower drain water heat recovery heat exchangers fouling	151
Recyclage par Reformage de Composites à Matrice Polyester	152
Performances hygrothermiques d'un composite en plâtre et fibres de Furcraea Foetida (choca vert)	153
Caractérisation thermomécanique de matrices latérites renforcés avec le typha pour l'isolation dans l'habitat	154
Influence des transferts d'humidité sur la transmittance thermique de murs en ossature bois	155
Experimental study to assess the effect of coatings radiative properties on the temperature of a Dadant hive	156
Dispositif de mesure de couches parasites par dissipation thermique et mesure de résistance thermique	157

Etude des propriétés physico-chimiques de composites biodégradables PLA/fibres naturelles destinés à une application bâtiment	158
Essais dynamiques pour caractériser le comportement thermique des murs - Application au béton de terre	159
Valorisation des déchets d'éléments d'ameublement (DEA) dans l'isolation thermique des bâtiments : Caractérisation thermophysique et analyse de cycle de vie	160
Analyse in-situ de la résistance thermique de parois d'une construction en terre crue	161
Caractérisation et simulation du comportement thermique d'éco matériau composite à base de terre de barre et fibre de coco.	162
Analyse de l'efficacité du type et du mode de fonctionnement de protections solaires mobiles sur un logement individuel à partir de simulations thermiques dynamiques . .	163
Caractérisation de la qualité de l'interface thermosoudée entre deux composites thermoplastiques	164
Effect of front and side confinement on a vertical heated plate with two-phase cooling . . .	165
Évaluation du potentiel des stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie : comparaison entre les méthodes psychrométriques et la modélisation dynamique	166
Optimisation du dimensionnement d'un condenseur à ailettes creuses interconnectées en polymère	167
Experimental and numerical study of constrained melting of metallic phase change material (PCM)	168
Contrôle des conditions de mise en forme d'une pièce composite à matrice thermodurcissable de très forte épaisseur	169
Etude numérique de dimensionnement et d'optimisation d'un caloduc spatial innovant . . .	170
In-hive temperature evolution: comparison between measurements and simulations	171
Impression 3D de structures en carbone ouvertes pour la production de vapeur d'eau par distillation solaire	172
Développement d'un composite MCP à base de cire d'abeille pour une gestion thermique optimale des piles à combustible PEMFC	173
Optimisation de la conception des parois du bâtiment pour la réduction des consommations énergétique	174
Modèle saisonnier de pont thermique	175
Development and Optimization of Electrically Resistant Paint for Road De-Icing: A Numerical and Experimental Study	176
Air-based sensible thermocline thermal energy storage numerical modelling and optimization over a charge-standby-discharge cycle	177
étude numérique du refroidissement par immersion d'un pack de batterie lithium-ion	178
Développement et caractérisation thermophysique de bio composite d'isolation à base de fibres de coir et gaines foliaires de cocotiers.	179
Vegetable oils as heat transfer fluids: literature review and thermal aging study under inert atmosphere	180
Optimisation thermique de la capture du CO ₂ par des composites MOF-graphite: approches expérimentales et modélisation thermique	181

Optimisation des propriétés thermiques, mécaniques et rhéologiques d'un mortier contenant du matériau à changement de phase	182
Caractériser la performance du rafraîchissement hybride dans un bâtiment de bureaux : focus sur le confort thermique	183
Vers la Modélisation multiphysique de la fusion par laser d'un analogue de Régolithe lunaire : Caractérisations Thermo-optiques	184
Thermal-hydraulic conditions at and downstream of a quench front during a Loss-of-Coolant Accident in a Pressurized Water Reactor	185
9 Thermographie	187
Transfert de chaleur lors d'impact d'une goutte sur une surface chaude texturée	188
Investigation par radiométrie photothermique à balayage de la porosité des pièces fabriquées par fusion par faisceau d'électrons	189
Inversion d'images thermographiques à l'aide d'images de synthèse (« rendus infrarouges ») : validation expérimentale et test de différentes méthodes de rendus	190
Développement d'une méthode de mesure de résistance thermique de contact entre 2 cylindres à partir d'excitations et de réponses de température en face avant	191
Screening accéléré pour la découverte de matériaux multi-composants durables et innovants pour le stockage d'énergie	192
Thermographie infrarouge multi- et hyper-spectrale pour la mesure de hautes températures de matériaux opaques et semi-transparents	193
Application d'une aide à la décision multicritère pour la réhabilitation d'un hangar des Restos du Cœur	194
Première mesure du spectre de l'émissivité du tungstène avant et après exposition dans le tokamak WEST	195
Bubble nucleation quantification for a single droplet impact onto a heated substrate	196
10 Transferts en Milieux Hétérogènes	197
Analysis of heat and mass transport in a complex PDMS-based porous medium	198
Modélisation du déclenchement de l'ébullition nucléée en convection forcée en régimes permanent et transitoire	199
Impact of internal flow on particle deposition in a locally heated sessile droplet	200
Élaboration et caractérisation des propriétés thermiques d'un matériau à gradient de propriétés céramique/métal	201
Performance d'extinction incendie d'un brouillard d'eau additivée aux alcools primaires linéaires : une analyse statistique	202
De la microstructure à la conductivité thermique dans des céramiques UO ₂ , par une technique mathématique originale	203
Caractérisation radiative d'un milieu fibreux par étude morphologique de l'empilement des cylindres le constituant et méthode Monte Carlo	204
Simulation des transferts thermiques par la méthode des cellules coupées	205
Analyse comparée de méthodes de résolution du couplage conduction-rayonnement dans des matériaux hétérogènes semi-transparents	206

Caractérisation de la qualité de l'interface thermosoudée entre deux composites thermoplastiques	207
Développement d'un protocole expérimental multi-échelles pour la quantification de l'évapotranspiration réelle en milieu urbain végétalisé	208

Liste des auteurs	209
--------------------------	------------

Partie II

Résumé des communications

Thème 1

Energétique

Towards low energy, low tech and low cost DHW production for buidlings	6
Optimal design of geothermal rain water tank for passive cooling buildings	7
Etude du transfert hydro-thermique du système géothermique : Mesure de la diffusivité isotherme de l'humidité des sols	8
Performance d'un moteur Ericsson à iso-volumes de compression et de détente selon différentes lois de commande des soupapes	9
Impact des choix structurels des Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI) sur le bilan et l'efficacité des transitions énergie-climat locales	10
Impact de l'évaporation de l'eau sur la caractérisation des propriétés intrinsèques d'un substrat capillaire	11
Étude de la production hybride de froid combinant une machine de froid solaire par sorption et une machine à compression de vapeur	12
Flexibilité des systèmes multi-énergétiques : État de l'art, définition et leviers	13
Étude expérimentale de la condensation de vapeur d'eau en écoulement vertical descendant au sein d'un mini canal	14
Optimisation du refroidissement par évaporation directe basée sur des matériaux organiques dans un climat méditerranéen	15
Production d'eau chaude sanitaire : chauffe-eau thermodynamique vs chauffe-eau solaire	16
Modélisation des transferts de chaleur au sein d'un film ruisselant	17
Green Hydrogen as an Energy Vector for Mobility and Residential buildings needs in Urban Areas	18
Multi-Objective Optimization of Photovoltaic (PV) Integration in Residential Buildings	19
Étude théorique et numérique de batteries de Carnot novatrices	20
Disponibilité industrielle des AHT pour la production de vapeur surchauffée par valorisation de chaleur fatale	21
Experimental analysis of the refrigerant two-phase flow in an absorption chiller based on GAX cycle	22
Expérimentation d'un prototype à absorption fonctionnant avec le couple $\text{LiNO}_3/\text{NH}_3$	23
Enquête sur l'état actuel des chauffe-eau solaires à tubes sous-vide directs au Burkina Faso : enseignements tirés et recommandations pour une plus grande adoption	24
Stockage thermique durable pour le Sahel : étude des propriétés de stockage à température ambiante des huiles de Lannea pour la technologie solaire à concentration	25
Caractérisation énergétique d'une cuisine solaire pour un restaurant	26
Récupération de chaleur industrielle par humidification	27

"toscana" - Territorial Solar Cadastre modeling and ANALysis - Un outils en accès libre pour évaluer le potentiel solaire des territoires	28
Modèle 1D-1D de condenseur avec le code CATHARE-3 pour la simulation à l'échelle système de cycles de Rankine	29
Outil d'aide à la décision pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle : Vers une industrie plus éco-efficace et résiliente	30
Etude numérique de l'influence de l'assistance par compresseur dans le cycle Absorption Heat Transformer pour valoriser des sources de chaleur fatales à basse température	31
Optimisation par Algorithme Génétique de la Performance Énergétique et du Confort Thermique d'un Système de Climatisation par Eau de Mer (SWAC)	32
Méthodologie de classification des bâtiments à l'échelle du quartier au regard de leur potentiel de flexibilité énergétique	33
Simulation d'une installation solaire aérovoltaïque sur un bâtiment non résidentiel existant via TRNSYS	34
Analyse exergo-économique de cycles thermodynamiques pour la réfrigération de moyenne puissance	35
Méthodologie de comparaison des pilotages conventionnel et par apprentissage profond en sous-station de réseaux de chaleur urbains	36
Stockage thermique pour le couplage entre récupération de chaleur fatale et production d'hydrogène dans un électrolyseur à oxyde solide : étude énergétique et technico-économique	37
Analyse numérique de la performance des panneaux photovoltaïques flottant et impact thermiques et énergétiques des facteurs environnementaux	38
Approche par cosimulation pour l'optimisation en temps réel du pilotage d'une centrale solaire existante	39
Analyse de cycle de vie d'un puits canadien : évaluation environnementale des systèmes pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments	40
Les stockages distribués pour diminuer la température d'opération des réseaux de chaleur existants	41
Simulation numérique du Stirling GPU3 avec gestion améliorée des sauts de section	42
Etude expérimentale et numérique d'un capteur solaire à tubes sous vide avec stockage intégrant un échangeur	43
Optimisation multiobjectif de la cuisson d'un produit céréalier	44
Analyse topologique des réseaux de chaleur nationaux	45
Développement de schémas RC comme outil de cartographie pour les besoins en chaud et en froid à l'échelle du bâtiment	46
Sobriété énergétique et optimisation intégrée des stratégies de rénovation et de gestion des bâtiments de bureaux en France : impacts énergétiques, économiques et environnementaux	47
Dimensionnement optimal de systèmes énergétiques solaires hybrides produisant de la chaleur et de l'électricité pour les procédés industriels	48
Étude numérique de l'intensification des échanges thermiques dans un stockage de chaleur latent par l'usage combiné de graphite naturel expansé compressé, ailettes et mélangeurs statiques	49
Conception d'un foyer de cuisson simple paroi amélioré utilisé au Bénin	50
Refroidissement direct d'Electronique de Puissance par l'utilisation de matériaux à changement de phase	51
Modélisation et optimisation d'un système multi-énergies pour le chauffage urbain	52
Modélisation d'une chaudière de récupération avec changement de phase et calcul du coefficient d'échange	53
Approche par cosimulation pour l'optimisation en temps réel du pilotage d'une centrale solaire existante	54

Analyses thermodynamiques statiques de cycles thermochimiques hybrides à éjecteur pour la valorisation en froid de chaleur basse température	55
Pilotage expérimental de la demande d'un bâtiment relié à un réseau de chaleur	56
Récepteurs solaires à lit fluidisé : analyse thermo-mécanique d'un tube absorbeur en carbure de silicium	57
Modélisation d'une géométrie spirale pour application de batterie	58
Prototypage d'une Pompe à Chaleur Haute Température pour utilisation dans les Batteries Carnot Intégrées Thermiquement	59
Modélisation dynamique d'un stockage souterrain à faible profondeur pour valoriser l'énergie solaire	60
SLiding Contact Investigation for Carbon Pantograph wear Evaluation (SLICE)	61
Optimisation énergétique des systèmes de climatisation centralisée à eau glacée dans les bâtiments tertiaires en milieu tropical humide	62

Towards low energy, low tech and low cost DHW production for buidlings

Jean-Baptiste Bouvenot¹

* ✉: jean-baptiste.bouvenot@insa-strasbourg.fr

¹ INSA Strasbourg/ICube Laboratory

Mots clés : DHW; grey water; drain water; waste heat; shower

Résumé :

The energy used for DHW is becoming an increasingly important part of a building's energy balance as a result of thermal renovation and stringent regulations for new buildings. Solar thermal systems are still underdeveloped and sometimes complicated to install, particularly in existing buildings. Most production is carried out in France using electric storage tanks and, to a lesser extent, thermodynamic storage tanks. It is also possible to recover the waste heat contained in grey water from showers. This can drastically reduce DHW consumption. The aim of this study is to make an energy comparison between different DHW production strategies that include a grey water heat recovery strategy: electric tank + heat recovery unit, thermodynamic tank + heat recovery unit and thermodynamic production using grey water as the cold source. This study will also take into account the development of biofilm in these exchangers, as well as dynamic effects.

Optimal design of geothermal rain water tank for passive cooling buildings

Lucas Striegel¹, Jean-Baptiste Bouvenot¹, Edouard Walther¹

* ✉: jean-baptiste.bouvenot@insa-strasbourg.fr

¹ INSA Strasbourg/ICube Laboratory

Mots clés : rain; geothermal energy; passive cooling; buildings; ventilation

Résumé :

On site water management is developing more and more, with increasingly stringent regulatory constraints. At the same time, climate change and the effects of urban heat islands are generating ever-greater cooling needs. So it makes sense to hybridise a system that both manages water on site and produces geothermal energy. The aim of this work is to set out the optimum dimensioning rules for this type of system (tank volume, minimum water level, burial depth, shape of tank, climate) and to check its performance in future climates. These rules will be established using a numerical model developed in Python and validated by in situ experimental measurements.

Etude du transfert hydro-thermique du système géothermique : Mesure de la diffusivité isotherme de l'humidité des sols

Wael Zeitoun¹, Jian Lin¹, Monica Siroux²

* ✉: jlin@unistra.fr

¹ Université de Strasbourg, Laboratoire ICUBE

² INSA Strasbourg, Laboratoire ICUBE

Mots clés : Système géothermique, échangeur air-sol, transfert d'humidité dans le sol, coefficient de diffusivité isotherme de l'humidité

Résumé :

La performance des systèmes géothermiques peu profonds est fortement influencée par la variation de l'humidité dans le sol. La teneur en eau est régie par le transfert d'humidité, qui dépend des gradients d'humidité. Pour étudier ce transfert, un dispositif expérimental a été conçu à l'Université de Strasbourg afin de mesurer la diffusivité isotherme de l'humidité dans des conditions de laboratoire contrôlées. Le dispositif se compose d'une colonne de sol équipée de capteurs d'humidité permettant de déterminer les gradients d'humidité, ce qui rend possible l'estimation de la diffusivité isotherme. Ces valeurs peuvent être utilisées dans des simulations numériques pour modéliser le comportement des systèmes géothermiques peu profonds, tels que les échangeurs de chaleur air-sol, sous diverses conditions d'humidité. De plus, l'incorporation d'une humidité variable du sol permet une représentation plus précise des propriétés thermo-physiques du sol dans ces simulations.

Performance d'un moteur Ericsson à iso-volumes de compression et de détente selon différentes lois de commande des soupapes

Pascal Stouffs¹

* ✉: pascal.stouffs@univ-pau.fr

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

Mots clés : Moteur Ericsson ; cycle de Joule ; commande des soupapes

Résumé :

Un moteur Ericsson est une machine thermique volumétrique à apport de chaleur externe, équipée de cylindres de compression et de détente distincts. Le fluide de travail est monophasique gazeux. Le cycle théorique de référence est donc le cycle de Joule. Le volume massique du fluide admis dans le cylindre de détente étant plus élevé que celui admis dans le cylindre de compression, ces moteurs sont généralement conçus de telle façon que la cylindrée du cylindre de détente est plus élevée que celle du cylindre de compression. Dans certains cas, cette disposition n'est pas possible, par exemple pour les moteurs Ericsson à piston libre à double effet, que le piston soit solide ou liquide. Dans ces conditions, deux solutions s'offrent au concepteur du moteur pour assurer l'égalité des débits massiques refoulé par le compresseur et aspiré par le cylindre de détente : soit retarder la fermeture de la soupape d'admission du cylindre de compression au-delà du point mort bas, ou celle de la soupape de refoulement au-delà du point mort haut pour réduire le débit massique, soit retarder la fermeture de la soupape d'admission du cylindre de détente pour absorber l'intégralité du débit fourni par le cylindre de compression. Dans le premier cas, les performances correspondent à celles du cycle de Joule classique, mais le compresseur doit également être équipé de soupapes commandées, au lieu de simples clapets automatiques ; dans le second cas, la puissance mécanique produite par unité de volume de cylindrée est plus importante, mais le rendement est plus faible car la détente dans le cylindre de détente est incomplète. Une étude détaillée du fonctionnement d'un moteur selon ces deux types de loi de commande des soupapes est menée en fonction de la pression et de la température maximale du cycle. Le modèle réalisé permet de quantifier la dégradation des performances observées dans le second cas, ainsi que les limites de fonctionnement de celui-ci.

Impact des choix structurels des Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI) sur le bilan et l'efficacité des transitions énergie-climat locales

Thierry De Larochelambert¹

* ✉: thierry.larochelambert@femto-st.fr

¹ Institut FEMTO-ST, Département Energie

Mots clés : efficacité énergétique ; système énergétique ; énergies renouvelables ; couplage intersectoriel ; couplage inter-vectorel ; stockages énergétiques ; simulation ; optimisation

Résumé :

Les Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI) s'imposent de plus en plus comme solutions pertinentes aux échelles locales aux défis climatiques et géopolitiques comme à la fragilisation croissante et à l'inefficacité des systèmes énergétiques classiques centralisés à faible couplage intersectoriel.

Les retours d'expérience européens récents indiquent que les grandes versatilité et adaptabilité locales des SERI due à leur forte intégration inter-secteurs, inter-vecteurs, inter-stockages et à leur caractère décentralisé semblent être la source de leur efficacité et de leur résilience.

Cet article étudie tout d'abord l'évolution des flux énergétiques au sein d'un SERI en fonction des possibilités de couplages structurels internes répondant à une répartition donnée des besoins énergétiques, pour déterminer l'impact des choix structurels (réseaux de chaleur, cogénérations, pompes à chaleur, véhicules électriques, etc.) sur l'efficacité du système, les productions primaires d'électricité nécessaires, les consommations de bioénergies, etc.

Il présente ensuite les résultats de simulations numériques horaires et annuelles d'un système énergétique à l'échelle d'un département français (Haut-Rhin) évoluant de sa structure actuelle vers celle d'un SERI par transformations systémiques successives, afin d'évaluer l'impact de celles-ci sur ses échanges électriques avec l'extérieur, ses émissions de gaz à effet de serre, ses importations d'énergie fossile et son efficacité énergétique globale. L'importance des stockages thermiques et électriques couplés aux différents réseaux d'énergie est mise en évidence.

Impact de l'évaporation de l'eau sur la caractérisation des propriétés intrinsèques d'un substrat capillaire

Laurence Leclef¹, Florine Giraud¹, Stéphane Lips², Benoit Stutz¹

* ✉: benoit.stutz@univ-smb.fr

¹ Laboratoire LOCIE

² CAELI Energie

Mots clés : Refroidissement adiabatique ; substrat capillaires mince ; dynamique d'imbibition ; transferts de masse et de chaleur couplés ; taux d'évaporation

Résumé :

Les technologies de refroidissement adiabatique par évaporation présentent des coefficients de performance élevés et ne requièrent pas l'utilisation de fluide frigorigènes. Elles permettent ainsi d'avoir des impacts environnementaux beaucoup plus faibles que les climatiseurs conventionnels. Certaines technologies de refroidissement indirectes mettent en œuvre des substrats capillaires minces pour humidifier l'air. L'efficacité de ces systèmes dépend fortement des propriétés du substrat capillaire qu'il est nécessaire de caractériser. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'évaporation sur la dynamique d'imbibition du substrat poreux et la détermination de ses propriétés.

La dynamique d'imbibition d'eau distillée dans un substrat capillaire mince vertical est étudiée expérimentalement avec et sans évaporation en condition d'air stagnant. La position du front d'imbibition, les températures de surface, de l'eau d'alimentation et de l'air ambiant, ainsi que l'humidité relative et les variations de masse d'eau du réservoir sont mesurées au cours du temps et analysées. La perméabilité et le rayon de pore effectif du substrat sont déterminés par méthode inverse à l'aide de l'équation de Washburn adimensionnée et des données expérimentales. Il est montré que le débit d'évaporation à la surface du substrat poreux impacte la détermination de ces paramètres.

Un modèle physique simplifié couplant des transferts de masse et de chaleur est proposé pour estimer le taux d'évaporation sur le substrat capillaire. Ses résultats sont comparés avec succès à des résultats expérimentaux spécifiques réalisés sur des échantillons de tailles différentes. Le taux d'évaporation prédit par le modèle est pris en compte dans la méthode inverse permettant de caractériser les propriétés du substrat capillaire.

Étude de la production hybride de froid combinant une machine de froid solaire par sorption et une machine à compression de vapeur

Souwera Stan Lionnel Somda¹, Kokouvi Edem N'Tsoukpoe¹, Nolwenn Le Pierrès², Djérambété Aristide Nadjingar¹, Ouo Adeline Ouattara¹, Adamah Messan³

* ✉: edem.ntsoukpoe@2ie-edu.org

¹ Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE), Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

² Laboratoire procédés énergie bâtiment (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB), CNRS UMR5271

³ Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD), Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

Mots clés : Froid par sorption; systèmes hybrides; TRNSYS; Sahel; confort thermique; climatisation

Résumé :

Au Sahel, où les coupures électriques sont récurrentes, la climatisation représente 60% de la facture énergétique dans les bâtiments climatisés. Les délestages électriques sont encore plus fréquents dans les saisons chaudes, quand les besoins de froid sont à leur pic. La technologie de froid solaire par sorption, qui ne requiert que très peu d'électricité pour le fonctionnement, a du mal à percer sur le marché du froid. L'utilisation de cette technologie pourrait permettre de réduire considérablement la demande d'électricité due à la climatisation permettant par la même occasion la disponibilité d'électricité pour les autres postes de consommation tel l'industrie et la limitation des délestages intempestifs. Une nouvelle approche pour la conception et le développement de ces procédés s'avère nécessaire afin d'augmenter leur attractivité. Cette étude se propose d'examiner le potentiel d'un système hybride alliant machine à froid solaire par sorption et la machine de climatisation classique. La machine à compression prend la relève en période de faible ensoleillement ou d'absence d'énergie solaire, ce qui permettrait d'optimiser le dimensionnement en vue de profiter des avantages de l'un et l'autre procédé et obtenir un procédé tout à fait économiquement attractif. Un prototype a été installé dans un amphithéâtre de 240 m² à Ouagadougou. Il s'agit d'une machine solaire à adsorption de 16,7 kW associée à un système de production de froid par compression de 17,9 kW. Dans ce travail, la modélisation dynamique du système sous TRNSYS est présentée avec les résultats préliminaires. L'objectif est de prendre en compte les fluctuations journalières de la demande en froid et de la disponibilité de la ressource solaire, d'étudier et d'étudier les stratégies de contrôle pour un fonctionnement optimal du système, la pertinence économique du concept et déterminer le couplage adéquat d'un point de vue technico-économique de ces deux systèmes de production de froid.

Flexibilité des systèmes multi-énergétiques : État de l'art, définition et leviers

Nathan Martin¹, Osman Junior¹, Astrid Ganswindt², Jaume Fitó-De-La-Cruz¹, Lamia Berrah³, Auline Rodler², Sihem Guernouti², Julien Ramousse¹

* ✉: osman.junior@univ-smb.fr

¹ LOCIE

² Cerema

³ LISTIC

Mots clés : flexibilité énergétique, réseaux d'énergies, systèmes multi-énergétiques, aide à la décision, indicateurs.

Résumé :

La gestion efficace de la flexibilité des systèmes énergétiques multiples est cruciale pour la transition énergétique actuelle et particulièrement au niveau du quartier. Il est primordial de répondre aux variations des besoins d'énergie qui résultent de la diversité des demandes des utilisateurs et de l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelable intermittente telles que l'éolien et le solaire. En ce qui concerne les quartiers et leur gestion énergétique devient complexe en raison des défis de collecte de données à petite échelle, à la complexité de la modélisation de comportements énergétiques spécifiques et à la variabilité des besoins énergétiques locaux, ainsi que l'utilisation variable des équipements énergétiques par les habitants.

Il est vital d'avoir des systèmes multi-énergies flexibles pour améliorer l'efficacité énergétique et maintenir un équilibre entre la production et la consommation face à ces défis particuliers.

Malgré les recherches approfondies sur la flexibilité énergétique à l'échelle régionale et nationale, peu d'études se concentrent sur cette question au niveau local dans les quartiers résidentiels, c'est dans cette vision que ce travail propose de réaliser un état de l'art des approches existantes pour l'évaluation de la flexibilité, en accord avec une attention particulière aux indicateurs techniques et économiques applicables aux systèmes multi-énergies à l'échelle du quartier. La méthodologie comprend une revue systématique de la littérature selon des critères définis, l'identification des leviers de flexibilité directs et indirects spécifiques à cette échelle, et la prise en compte des incertitudes stochastiques liées à l'approvisionnement énergétique et aux évolutions climatiques. Ce travail aboutira à la définition d'indicateurs de performance adaptés aux enjeux des systèmes énergétiques des quartiers, contribuant ainsi au développement d'un référentiel d'aide à la décision pour les acteurs du secteur.

Étude expérimentale de la condensation de vapeur d'eau en écoulement vertical descendant au sein d'un mini canal

Camille Dedion¹, Sébastien Renaudière De Vaux¹, Baptiste Grosjean¹, Marc Miscevic², Pascal Lavieille², Frédéric Topin³

* ✉: adrien.dedion@cea.fr

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

² LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS

³ IUSTI, Aix-Marseille University

Mots clés : Diphasique; Condensation; millimétrique; vapeur d'eau; transfert thermique

Résumé :

La condensation convective est largement utilisée dans l'industrie. Néanmoins, dans le cas de l'eau circulant dans des canaux de taille millimétrique, la modélisation du coefficient de transfert thermique n'est pas correctement maîtrisée. Dans cette configuration, les effets capillaires entrent en concurrence avec les autres effets (cisaillement, gravité et inertie). La plupart des lois disponibles dans la littérature ne prennent pas en compte les effets capillaires. De plus, elles concernent principalement les liquides frigorigènes, dont les propriétés varient significativement par rapport à l'eau. Les effets capillaires deviennent prépondérants pour un nombre de Bond inférieur à 4 et un nombre de Weber petit devant 100. Nous nous concentrons donc sur l'étude de la condensation dans un tube de diamètre intérieur 3 mm, à une pression variant de 1 à 2 bar et pour des vitesses massiques variant de 10 à 100 kg.m⁻².s⁻¹, ce qui correspond à un nombre de Bond d'environ 1 et un nombre de Weber variant entre 10 et 1000. Étant donné le manque de données dans ces conditions, une boucle expérimentale a été développée pour étudier la condensation de vapeur d'eau dans ces gammes de paramètres. Elle comporte une section est composée d'un condenseur vertical de 1 m permettant de mesurer 10 coefficients d'échanges thermiques moyennés sur 10 cm. Un tube en verre est installé au milieu du condenseur, sur une portion adiabatique, afin de pouvoir visualiser les régimes d'écoulements. Cette boucle doit permettre de développer une nouvelle corrélation permettant de modéliser correctement le transfert thermique et de comprendre les mécanismes régissant le transfert thermique dans ces conditions.

Optimisation du refroidissement par évaporation directe basée sur des matériaux organiques dans un climat méditerranéen

Soulaimane Sabri¹, Mustapha Mahdaoui², Azzeddine Laknizi³, Mohammed Ahachad¹, Mustapha Ouardouz¹, Aicha Chorak⁴

* ✉: mustapha.mahdaoui@uphf.fr

¹ MASEEL FSTT UAE Maroc

² LAMIH UPHF

³ LFP UAE Maroc

⁴ New Science School of Engineering (ENSI)

Mots clés : Refroidissement par évaporation directe ; Matériaux organiques ; Efficacité de saturation ; Capacité de refroidissement ; EER

Résumé :

La croissance démographique mondiale, combinée à la demande croissante de confort thermique, a entraîné une augmentation significative de la consommation d'énergie, notamment dans la climatisation. Cette tendance exerce une pression considérable sur les ressources énergétiques et aggrave les impacts environnementaux. Dans ce contexte, le refroidissement par évaporation directe (Direct Evaporative Cooling, DEC) émerge comme une alternative prometteuse et écologique. Cette technologie offre une solution durable en réduisant la consommation énergétique, tout en répondant aux besoins des régions chaudes, où elle est particulièrement adaptée. Contrairement aux systèmes de climatisation traditionnels, qu'ils soient frigorifiques ou à absorption, le DEC se distingue par plusieurs avantages notables : une faible consommation d'énergie, l'absence de fluides frigorigènes polluants et une meilleure efficacité dans les climats chauds et secs. Ces caractéristiques en font une option compétitive dans le cadre de la transition énergétique et de la lutte contre le changement climatique. Afin d'optimiser l'efficacité énergétique des systèmes DEC, une étude a été réalisée en intégrant des matériaux organiques locaux, reconnus pour leur accessibilité et leur durabilité. Un banc d'essai expérimental a été conçu pour évaluer les performances thermiques et énergétiques de cinq matériaux naturels : fibres d'eucalyptus, laine de mouton, cellulose de cactus, fibres de palmier et copeaux de bois. Les tests, effectués à des vitesses d'air variant entre 1,4 et 5 m/s, ont permis de caractériser la contribution de ces matériaux à l'amélioration des performances du système. Parmi les matériaux étudiés, les fibres d'eucalyptus et la cellulose de cactus se sont distinguées par leur efficacité. Les fibres d'eucalyptus affichent une efficacité de saturation comprise entre 43,60 % et 51,66 %, tandis que la cellulose de cactus atteint des valeurs comprises entre 41 % et 58 %.

Production d'eau chaude sanitaire : chauffe-eau thermodynamique vs chauffe-eau solaire

Régis Olivès¹, Jean-Marie Mancaux¹, Maxime Perier-Muzet¹

* ✉: olives@univ-perp.fr

¹ PROMES-CNRS - Université de Perpignan Via Domitia

Mots clés : eau chaude sanitaire; chauffe-eau solaire; chauffe-eau thermodynamique, économies d'énergie, décarbonation, scénario

Résumé :

La consommation d'énergie due à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) en France est évaluée à 75 TWh. Actuellement, les cumuls électriques et les chauffe-eau thermodynamiques (CET) représentent 51 % des systèmes de production d'ECS en fonctionnement avec une consommation d'environ 20 TWh. Quant aux chauffe-eau solaires (CES), ils contribuent actuellement à économiser environ 2,4 TWh.

Selon un scénario de RTE, l'électrification des usages thermiques et le remplacement de 9,5 millions de cumulus électriques par autant de CET conduiraient à une économie d'énergie de 3,5 TWh. Nous avons montré précédemment qu'installer 9,5 millions de CES permettrait d'économiser 16 TWh et d'éviter près de 5 millions de tonnes de CO₂ par an.

La comparaison de deux cas réels situés au même endroit (Pyrénées-Orientales) a été menée. Les deux systèmes sont évalués selon des critères issus de l'analyse de cycle de vie (contenu CO₂, demande en énergie cumulée, quantité de matériaux utilisés. . .). L'analyse confirme le gain très net du CES par rapport au CET. On constate, par exemple sur l'aspect énergétique, qu'après mesure au cours d'une année complète, l'énergie électrique nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire est de 4,46 kWh/m³ pour le CES alors qu'elle s'élève à 13,48 kWh/m³ pour le CET, soit trois fois supérieure.

Nous extrapolons ces résultats à la région Occitanie. Nous tenons compte de la situation actuelle et du potentiel solaire et établissons un scénario d'ici 2050 qui montre les économies réalisées, les émissions de CO₂ évitées et l'atteinte plus aisée de l'objectif de la région Occitanie à devenir territoire à énergie positive. Ainsi, l'installation d'un million de CES, soit l'équipement de près d'1/3 des résidences principales en Occitanie, correspondrait à une surface de 660 m² pour 1000 habitants. L'énergie effectivement économisée s'élèverait alors à 1,7 TWh et les émissions de CO₂ évitées atteindraient en moyenne 0,8 Mt.

Modélisation des transferts de chaleur au sein d'un film ruisselant

Igin Benny Ignatius¹, Christian Ruyer-Quil¹

* ✉: ruyerquc@univ-smb.fr

¹ LOCIE Université Savoie Mont Blanc

Mots clés : films ruisselants ; ondes longues ; méthode aux résidus pondérés

Résumé :

Le régime désordonné d'ondes en interaction à la surface d'un film ruisselant est bien connu pour intensifier les transferts de chaleur et de masse à la paroi ou à la surface libre du film liquide. L'objectif est d'utiliser ce régime ondulatoire pour optimiser de nouveaux concepts d'échangeurs de chaleur à plaques et films ruisselants. On s'intéresse dans cette étude au transfert de chaleur au sein du film sur une paroi chauffée modélisé par une condition mixte de température. Une des difficultés majeures de l'étude des transferts au sein des films ruisselants est le lent établissement du régime ondulatoire caractérisé par une suite de brisures de symétrie et une dynamique d'appariement particulièrement lente. L'échelle représentative des phénomènes au sein d'un échangeur est donc la taille d'une plaque, ce qui représente un défi numérique quasi insurmontable pour des simulations numériques directes. On propose donc dans ce travail une modélisation des transferts de chaleur et de l'hydrodynamique du film à l'aide de modèles réduits obtenus par la méthode des résidus pondérés. Le modèle obtenu permet de capturer de manière satisfaisante les flux de chaleur à la paroi et à la surface libre pour une gamme étendue de nombres de Péclet.

Green Hydrogen as an Energy Vector for Mobility and Residential buildings needs in Urban Areas

Ghada Ben Khalifa¹, Anna Lushnikova¹, Christophe Ménézo¹

* ✉: christophe.menezo@univ-smb.fr

¹ LOCIE CNRS/USMB

Mots clés : energy vector, hydrogen, Photovoltaic, NPV, climate change

Résumé :

Climate change and energy crises are currently the most critical threats facing humankind. According to the Paris Agreement, governments accepted net-zero scenario strategies to control global warming. Urbanization drives environmental pressures, contributing to climate change through high CO₂ emissions and energy use. To address the energy crisis, we aim for a comprehensive, carbon-neutral solution to meet energy demand and store excess production efficiently. Our focus is on implementing Zero Energy Cost Buildings (nZEcB). The study will use a combinatorial approach to explore combinations of production, storage, conversion, and demand adaptation to meet energy needs, emphasizing green hydrogen as an energy vector for mobility and buildings

We aimed to develop model of annual electric and thermal energy consumption, along with photovoltaic production profiles, for single-family homes in Central Europe. Weather data from PVGIS is integrated to simulate solar PV production with pvlib. For further study, we are considering modeling hydrogen production using solar energy at the residential district level to satisfy energy demand.

For this study, the spatial scale will range from the level of the building to urban areas. Below the neighborhood level, production and consumption are matched by means of microgrids that need to be aggregated in order to contribute to flexibility. Furthermore, evaluating the project's cost-benefit using tools like Net Present Value (NPV) is essential.

Multi-Objective Optimization of Photovoltaic (PV) Integration in Residential Buildings

Farzaneh Changizi¹, Martin Thebault¹, Christophe Ménézo¹

* ✉: christophe.menezo@univ-smb.fr

¹ LOCIE CNRS/USMB

Mots clés : Photovoltaic, Optimization, Multi-Objective, Load-Matching, Economy

Résumé :

The integration of photovoltaic (PV) systems into residential buildings offers a promising pathway to enhance self-consumption, reduce carbon emissions, and improve economic returns in urban settings through renewable energy utilization. As urbanization accelerates and energy demands grow, optimizing the placement of PV systems on building surfaces, including roofs and façades, is crucial for achieving sustainability goals. This study employs a multi-objective optimization framework for PV integration, balancing energy and economic objectives.

The primary energy objective is maximizing load matching, ensuring that the generated PV power closely aligns with the building's energy demand. Economic objectives include optimizing net present value, payback period, and levelized cost of energy. A typical residential building was modeled, with single-objective functions addressing these goals, while a multi-objective approach analyzes trade-offs using Pareto fronts to identify optimal solutions.

Furthermore, the study evaluates the impact of 12 distinct load profiles, representing various building heating systems, to assess the influence of consumption patterns on PV optimization outcomes. The results underscore the critical role of load patterns and installation cost variations in determining optimal PV configurations. Influences of the modelling of irradiance, through the reflection an issue irradiance modelling on the optimal design. These findings demonstrate how optimized PV allocations can enhance energy efficiency and economic feasibility across diverse building conditions and locations.

Étude théorique et numérique de batteries de Carnot novatrices

Benoît Payebien¹, Nicolas Tauveron¹, Nadia Caney¹

* ✉: benoit.payebien@cea.fr

¹ CEA Grenoble

Mots clés : Batterie de Carnot; Stockage; Services réseau; Flexibilité

Résumé :

Une batterie de Carnot (BC) est un système de stockage énergétique reposant sur une première conversion d'électricité en chaleur via un procédé de charge, un médium de stockage thermique et un cycle de décharge permettant la reconversion de chaleur en électricité. Les batteries de Carnot sont une alternative crédible aux autres technologies de stockage massif d'électricité, grâce à l'absence de contraintes géographiques lors de leur implantation et le fait qu'elles aient peu recours à des matériaux critiques.

Dans ces travaux, un type de BC particulier est étudié, il s'agit des batteries de Carnot couplées (BCC). Le concept derrière cette architecture repose sur le couplage entre une centrale thermique de production électrique et un module de BC composé d'un procédé de charge et d'un stockage thermique. L'architecture des BCC conduit à une augmentation du rendement de conversion par rapport aux BC simples mais également à une augmentation de la réactivité du système et à une diminution des coûts d'infrastructure due à la mutualisation du cycle moteur.

Dans ce travail une tentative de classification des différents concepts de BC est proposée, sous l'angle des services rendus au réseau électrique par les BC. Ensuite une étude analytique et théorique des BCC est proposée, à travers la définition d'indicateurs pertinents. En particulier, l'adoption d'une méthode de calcul permettant d'étendre la définition du rendement aux différents types de BC est discutée. Une étude d'architecture est également menée, visant à déterminer les configurations de BCC qui conduisent à des résultats prometteurs. Cette étude réalisée sous le logiciel Engineering Equations Solver consiste en une optimisation multicritère des trois sous-composants d'une BCC selon les architectures considérées. Les résultats des simulations recouvrant la diversité des configurations de BCC seront discutés. Les résultats d'une étude de sensibilité des différents sous-composants des BCC seront également exposés.

Disponibilité industrielle des AHT pour la production de vapeur surchauffée par valorisation de chaleur fatale

Anouk Muller¹

* ✉: anouk.muller@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA-Liten

Mots clés : Transformateur de chaleur ; Absorption ; Chaleur fatale ; Vapeur

Résumé :

En 2017, l'ADEME évaluait le gisement national de chaleur fatale industrielle à 109,5 TWh. La valorisation efficace de la chaleur fatale non évitable représente un enjeu crucial pour la décarbonation des sites industriels. Lorsque la température des effluents captés s'avère trop basse pour répondre aux besoins de chaleur identifiés, la stratégie de valorisation peut s'orienter vers une remontée du niveau thermique.

A cet effet, l'Absorption Heat Transformer (AHT, ou pompe à chaleur à absorption de type 2) se distingue par sa capacité à rehausser la température de la chaleur fatale au prix d'une consommation électrique minimale, offrant ainsi une alternative méconnue aux pompes à chaleur à compression mécanique de vapeur (PAC-CMV) ou la recompression mécanique de vapeur (RMV). Cependant, il existe peu de retours d'expérience documentés sur l'intégration d'AHT dans un contexte industriel. Un état des lieux est pourtant indispensable pour soutenir les industriels dans leurs choix technologiques.

Dans ce contexte, une étude de cas issu du secteur pétrochimique a été menée pour évaluer la faisabilité technique de l'intégration d'un AHT sur un site industriel existant. L'ambition est de répondre à un besoin interne en vapeur surchauffée, vecteur énergétique essentiel pour de nombreux processus industriels, en valorisant les effluents de vapeur polluée en sortie de process. Plus largement, cette étude a permis d'évaluer la disponibilité sur le marché actuel d'AHT en mesure de répondre au besoin industriel de production de vapeur surchauffée (180°C) à partir d'effluents à moyenne température (80 à 100°C) au travers de :

- L'identification des acteurs actuels et des aspects différenciant de leur offre technique ;
- L'étude d'intégration énergétique de l'AHT selon plusieurs architectures (AHT seul, couplé avec un compresseur de vapeur ou couplé avec un bouilleur électrique) ;
- La pré-quantification d'indicateurs-clés (rendement, consommation électrique, coût).

Experimental analysis of the refrigerant two-phase flow in an absorption chiller based on GAX cycle

Van Kha Pham¹, Nolwenn Le Pierrès¹, Hai Trieu Phan²

* ✉: van-kha.pham@univ-smb.fr

¹ Laboratoire procédés énergie bâtiment (LOCIE) – CNRS, Université Savoie Mont Blanc

² CEA, LITEN – Université Grenoble Alpes

Mots clés : ammonia-water; absorption chiller; Generator-Absorber heat-exchange; two-phase flow

Résumé :

The International Energy Agency reported the growing demand for cooling over the next three decades as one of the top drivers of global electricity consumption. To cut down the electricity demand and the carbon dioxide emissions, an encouraging alternative to the conventional chillers is the adoption of absorption machines operating with abundant and sustainable heat sources, like solar radiation or industrial waste heat. Within the framework of the European FriendSHIP project, a prototype of ammonia-water absorption chiller fed by solar heat has been developed to produce cold at -20°C for industrial applications. Thanks to its innovative architecture based on a Generator-Absorber heat-exchange (GAX) cycle, a part of the heat rejected by the absorption process is recovered to generate the refrigerant vapor, thereby reducing the required heat from the external heat source supplied at the generator, and thus improving the performance of the cycle. The main goal of this research is to analyze the experimental data of a ammonia-water Generator-Absorber heat-exchange cooling cycle to evaluate the different operating conditions of the system. The analysis of experimental results enable to determine the thermodynamic conditions of the refrigerant flow and evaluate the performance of the evaporator, which is shown as the key component limiting the chiller performance. This study demonstrates that the refrigerant purity has a strong role in the two-phase flow conditions and the deviation between the bubble and dew lines of the ammonia-water couple can lead to limitation of the evaporation capacity.

Expérimentation d'un prototype à absorption fonctionnant avec le couple $\text{LiNO}_3/\text{NH}_3$

Mame Sokhna Thiane Seck¹, Kokouvi Edem N'Tsoukpoe², Nolwenn Le Pierrès³

* ✉: mame-sokhna-thiane.seck@univ-smb.fr

¹ USMB (LOCIE/France) et 2iE (LabEREE/Burkina Faso)

² Laboratoire Energies Renouvelable et Efficacité Energétique (LabEREE), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

³ Laboratoire procédés énergie bâtiment (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB)

Mots clés : Absorption; Réfrigération; Climatisation; Ammoniac; Nitrate de lithium; Prototype

Résumé :

L'utilisation des énergies fossiles impacte fortement l'environnement, notamment par la pollution et le changement climatique. Pour y remédier, des solutions cherchent à réduire leur usage tout en intégrant les énergies renouvelables, particulièrement dans la production de froid. Les machines à absorption, alimentées par des sources renouvelables, offrent des alternatives prometteuses en climatisation et réfrigération. Ces machines, composées d'un absorbeur, d'un désorbeur, d'un condenseur et d'un évaporateur, utilisent des mélanges binaires tels que $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Bien que performant, ce couple nécessite un rectifieur, ce qui pénalise l'efficacité.

Dans notre étude, un prototype utilisant la paire $\text{LiNO}_3/\text{NH}_3$ a été testé. Le nitrate de lithium supprime le besoin de rectifieur, simplifiant ainsi le système. Des essais ont été menés avec des températures des fluides externes adaptées aux capteurs solaires thermiques : entre 3 °C et 15 °C pour l'évaporateur, 30 °C à 45 °C pour le condenseur et l'absorbeur, et 70 °C à 90 °C pour le désorbeur. Les débits variaient entre 0,16 kg/s et 0,21 kg/s.

Les résultats montrent un COP variant de 0,13 à 0,29, avec des incertitudes de 10 % à 13 %. Le meilleur COP a été obtenu pour des températures de 15 °C à l'évaporateur, 35,2 °C au condenseur, 34,5 °C à l'absorbeur, et 88,6 °C au désorbeur. Lors du passage de 3 °C à 15 °C à l'évaporateur, une heure d'adaptation a été nécessaire.

Enquête sur l'état actuel des chauffe-eau solaires à tubes sous-vide directs au Burkina Faso : enseignements tirés et recommandations pour une plus grande adoption

Kokouvi Edem N'Tsoukpoe¹, Claude Sara Lekombo¹, Malicki Zorom², Komlan Gagno José N'Tsoukpoe¹

* ✉: edem.ntsoukpoe@2ie-edu.org

¹ Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE), Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

² Laboratoire Eau, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

Mots clés : chauffe-eau solaire ; capteurs à tubes sous-vide directs ; défaillance de vanne à flotteur ; satisfaction des utilisateurs ; évaluation technologique ; Burkina Faso

Résumé :

Les chauffe-eau solaires (CES) offrent une alternative durable aux méthodes conventionnelles de chauffage de l'eau dans les régions riches en soleil comme le Burkina Faso [1]. Les à tubes sous-vide directs (WiG-ET_C) [2,3] sont répandus sur le marché local d'Ouagadougou. Cependant, leur viabilité à long terme, leurs performances et leurs besoins en maintenance restent peu explorés [4]. L'industrie locale de fabrication des CES à capteurs plans a décliné, faisant des WiG-ET_C une option de plus en plus importante [5]. Cette étude vise à évaluer le potentiel et les défis des WiG-ET_C au Burkina Faso. La recherche combine une revue de la littérature, une analyse du marché et une enquête de terrain. L'enquête a ciblé 31 systèmes WiG-ET_C à travers Ouagadougou, dont 24 ménages et une résidence de séminaire. Les participants ont répondu à des questions sur le fonctionnement du système, les problèmes de maintenance et la satisfaction des utilisateurs. Les inspections ont inclus le nombre de tubes, le matériau du réservoir, l'angle d'inclinaison et les signes de rouille. L'enquête a révélé que 94% des systèmes étaient opérationnels, avec des problèmes courants tels que des vannes à flotteur défectueuses (35%) et des fuites d'eau (29%). Les réservoirs en acier inoxydable ont montré une durabilité supérieure, certains systèmes ayant plus de 14 ans de fonctionnement. La satisfaction des utilisateurs était élevée, 97% des répondants étant satisfaits de leur investissement et 74% signalant une disponibilité d'eau chaude toute l'année. Les WiG-ET_C ont un potentiel significatif au Burkina Faso, démontrant une fiabilité opérationnelle élevée et une satisfaction des utilisateurs. Les réservoirs en acier inoxydable sont recommandés pour une meilleure longévité. Les principaux défis comprennent la résolution des défaillances des vannes à flotteur et des fuites d'eau, ce qui nécessite une meilleure qualité des composants et des pratiques de maintenance.

Stockage thermique durable pour le Sahel : étude des propriétés de stockage à température ambiante des huiles de *Lannea* pour la technologie solaire à concentration

Mahamadou Maiga¹, Kokouvi Edem N'Tsoukpoe¹

* ✉: edem.ntsoukpoe@2ie-edu.org

¹ Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE), Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

Mots clés : Huile de graines de *Lannea microcarpa* ; huile de graines de *Lannea kerstingii*; stockage thermique; huiles végétales; Sahel

Résumé :

Face aux défis énergétiques du Sahel, la technologie solaire à concentration (CSP) a été identifiée comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques, notamment dans les zones rurales. Dans le cadre de CSP4Africa, différents aspects du développement de microcentrales CSP à forte valeur ajoutée locale en Afrique de l'Ouest sont explorées. L'objectif était d'utiliser des ressources locales pour réduire les coûts et rendre la technologie plus durable. Sur le plan du stockage thermique, plusieurs huiles végétales produites localement, comme celles de *Jatropha curcas*, *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii*, ont été testées comme fluides de transfert et de stockage de chaleur. Dans la présente étude, nous avons examiné l'impact du stockage à température ambiante sur l'huile de graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile de graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO). Les deux huiles, LaMSO et LaKSO, ont démontré une grande capacité de stockage à température ambiante sans dégradation majeure. Elles ont été vieillies en présence et en absence de métaux industriels courants, à température ambiante, puis leurs propriétés thermophysiques et chimiques ont été analysées pendant un an. Les analyses ont montré que les propriétés des deux huiles sont restées largement stables en absence de métaux. Aucun changement significatif n'a été observé dans les propriétés analysées, notamment le point d'éclair, le point de fusion, la masse volumique et la viscosité. De plus, les deux huiles ont présenté une excellente compatibilité avec l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, tandis que l'acier galvanisé et le cuivre ont accéléré leur oxydation, avec un impact significatif sur leurs propriétés chimiques. Globalement, les résultats suggèrent que les huiles de graines de *Lannea kerstingii* et de *Lannea microcarpa* maintiennent une stabilité raisonnable pendant un stockage à long terme à température ambiante, jusqu'à un an, avec une meilleure résistance à l'oxydation pour LaKSO.

Caractérisation énergétique d'une cuisine solaire pour un restaurant

Bastien Sanglard¹, Xavier Apaolaza-Pagoaga², Thomas Fasquelle¹, Séverine Barbosa¹, Benjamin Kadoch¹

* ✉: bastien.sanglard@univ-amu.fr

¹ IUSTI, CNRS, Université Aix-Marseille

² Groupe de recherche Energy, Département d'ingénierie mécanique, thermique et des fluides, université de Malaga

Mots clés : Solare thermique; Cuisine solaire; Test standard; Scheffler

Résumé :

Le travail présenté dans cette étude a pour objectif de caractériser énergétiquement une cuisine solaire pour un restaurant, Le Présage, qui utilise un système comprenant un collecteur Scheffler, un réflecteur secondaire et une plaque de cuisson. Le collecteur Scheffler est utilisé en raison de son point focal fixe et déporté ce qui permet de placer la plaque de cuisson à l'intérieur du restaurant alors que le collecteur est à l'extérieur. Pour l'étude, l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) dispose d'un banc de test composé d'un Scheffler de 8 m² et d'un réflecteur secondaire qui est utilisé pour les mesures. La caractérisation se base sur la méthode des tests standards décrite par la norme ASAE S580.1, et utilisée ainsi qu'améliorée dans de nombreuses publications. Cette méthode permet d'accéder à la puissance standard et au rendement énergétique de l'installation complète (réflecteur secondaire et primaire). Cette caractérisation permet de comparer le système de cuisson avec d'autres cuisines solaires ou une installation conventionnelle. Enfin, des pistes d'amélioration sont proposées et étudiées.

Récupération de chaleur industrielle par humidification

Julien Scrève¹, Ward De Paepe¹

* ✉: Julien.Screve@umons.ac.be

¹ UMONS

Mots clés : Récupération ; Chaleur latente ; Humidification ; Basse température ; Condensation

Résumé :

Pour réduire drastiquement les émissions de CO₂, l'efficacité énergétique des systèmes de combustion doit être améliorée car la moitié de notre énergie primaire est perdue en chaleur résiduelle via les gaz de combustion. Plusieurs technologies de récupération directe ou indirecte de cette chaleur ont été développées. Bien que ces techniques réduisent la température des gaz de combustion, seules les chaudières à condensation récupèrent la chaleur latente contenue dans ces gaz, représentant 20-25 % de cette énergie. Avec l'essor attendu du Power-to-Fuel et de l'hydrogène vert, cette chaleur latente deviendra cruciale en raison de la fraction d'eau croissante dans les gaz. Le principal défi est alors de récupérer l'énergie sous le point de rosée, en assurant un transfert de chaleur efficace à basse température. Un défi que les systèmes actuels échouent souvent à relever. Cependant, ce dernier peut être résolu par l'évaporation de l'eau à l'entrée de l'air froid, permettant la récupération directe de la chaleur latente libérée lors de la condensation de la vapeur d'eau. Ce procédé est au cœur de ce projet, qui se focalise sur la récupération de chaleur industrielle avec humidification. Ce projet vise à développer une méthode d'introduction d'eau dans les systèmes de récupération de chaleur des gaz de combustion, avec pour but ultime d'utiliser l'eau comme vecteur d'énergie. Le projet passe alors par plusieurs étapes dont l'identification du potentiel de récupération via le second principe de la thermodynamique, l'exploration de nouvelles technologies de refroidissement indirect par évaporation pour améliorer la récupération de chaleur, et le développement d'outils pour intégrer efficacement cette technologie dans les réseaux d'échangeurs de chaleur. Le système étudié, une fois démontré, pourrait permettre la récupération (partielle) des 641 TWh/an (20,2 % de l'utilisation d'énergie primaire de l'industrie) de chaleur résiduelle actuellement inaccessibles dans l'UE.

"toscana" - TerritOriental Solar Cadastre modeling and ANALysis - Un outils en accès libre pour évaluer le potentiel solaire des territoires

Apolline Ferry¹, Martin Thebault², Boris Nérot¹, Lamia Berrah³, Christophe Ménézo¹

* ✉: martin.thebault@gmail.com

¹ LOCIE - USMB

² LOCIE - CNRS

³ LISTIC - USMB

Mots clés : irradiance; énergie solaire; territoire; cartographie; accès-libre

Résumé :

Avec l'augmentation des conséquences du changement climatique, de nombreuses politiques ont été élaborées afin de réduire les émissions de CO₂, notamment par le développement des énergies renouvelables. En Mars 2023, la loi APER (Loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables) a été promulguée, avec pour objectif de promouvoir la production d'énergie renouvelable à échelle locale. Parmi ces énergies, l'énergie solaire présente l'avantage d'être disponible sur l'ensemble des territoires (plaines, montagnes), mais à différents niveaux de potentiels. L'estimation du potentiel de production d'électricité solaire nécessite une évaluation précise de la ressource solaire reçue par les surfaces des territoires, en particulier les toitures des bâtiments.

Pour répondre à ce besoin, l'outil TOSCANA a été développé, permettant de générer des cadastres solaires à l'échelle d'un territoire. Cet outil est basé sur une nouvelle approche permettant de systématiser et automatiser les calculs et le traitement des données, pour un territoire sélectionné en France. La méthode développée permet de couvrir de larges zones, avec une grande précision, et est particulièrement adaptée aux régions montagneuses, caractérisées par de fortes variations spatiales.

L'outil est ainsi destiné aux décideurs politiques pour encourager le développement des systèmes solaires dans les zones à fort potentiel. Des perspectives de développement incluent l'extension de la méthodologie à l'ensemble de l'Europe ainsi que la prise en compte de la morphologie détaillée des toitures des bâtiments, grâce à l'utilisation de données LiDAR.

Modèle 1D-1D de condenseur avec le code CATHARE-3 pour la simulation à l'échelle système de cycles de Rankine

Vincent Audoly¹, Laura Matteo¹, Claire Vaglio-Gaudard¹, Gédéon Mauger², Nicolas Tauveron³

* ✉: vincent.audoly@cea.fr

¹ CEA Cadarache, DES/IRESNE/DER

² CEA Saclay, DES/ISAS/DM2S, Université Paris-Saclay

³ CEA Grenoble, DRT/LITEN/DT_CH, Univ. Grenoble Alpes

Mots clés : Condenseur, cycles de Rankine, modélisation, thermohydraulique

Résumé :

Le condenseur est un composant clé des cycles de Rankine, massivement utilisés dans les centrales thermiques telles que les centrales nucléaires. Les condenseurs de centrales nucléaires sont généralement des échangeurs à tubes et calandre dans lesquels la vapeur issue de la turbine basse-pression vient se condenser au contact des tubes dans lesquels circule l'eau de refroidissement. La pression qui s'établit dans le condenseur, qui dépend de l'efficacité des échanges thermiques, influence directement la production électrique et donc le rendement de la centrale. Dans le cadre de la simulation à l'échelle système des cycles de Rankine, il est donc primordial de disposer d'un modèle dynamique de condenseur rendant compte de sa performance en régime nominal et hors-nominal. Dans cet article, un modèle de condenseur 1D-1D est proposé et implémenté dans le code de thermohydraulique CATHARE-3. Les résultats obtenus sont comparés d'une part à des résultats expérimentaux issus de la littérature et d'autre part à l'approche corrélative du Heat Exchange Institute (HEI). La contribution de différents phénomènes à la résistance thermique totale est discutée. Un bon accord est obtenu entre l'approche HEI et le modèle développé. En outre, le présent modèle permet de simuler le comportement dynamique du condenseur.

Outil d'aide à la décision pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle : Vers une industrie plus éco-efficace et résiliente

Mohamed Amine Ben Taher¹, Manal Aatik¹, Alaa Hamadi¹, Bulent Baris¹

* ✉: mohamed-amine.ben-taher@capgemini.com

¹ Capgemini Engineering

Mots clés : Transition industrielle; Outil d'aide à la décision; Optimisation énergétique; Valorisation chaleur fatale; Analyse 3E

Résumé :

L'industrie rejette une part importante de l'énergie consommée sous forme de chaleur fatale, une ressource souvent sous-exploitée qui contribue à l'augmentation de la consommation énergétique, à la pollution et aux émissions de gaz à effet de serre. Pour répondre à ce défi, un outil numérique d'aide à la décision a été développé dans le cadre du projet de recherche et d'innovation (R&I) Sim4energies, afin d'accompagner les industriels dans l'identification de solutions techniques pour récupérer et valoriser cette chaleur dans une perspective d'efficacité énergétique et de durabilité.

Cet outil s'appuie sur la méthodologie 3E (Énergétique, Exergétique, Environnementale) pour évaluer les indicateurs clés de performance des chaînes de processus industriels. Il permet de simuler des processus de conversion d'énergie, tels que le cycle organique de Rankine, d'analyser les impacts environnementaux et exergétiques, de quantifier la production d'hydrogène par électrolyse et de sélectionner le fluide de travail optimal. La robustesse et l'applicabilité de cet outil sont validées par des études de cas dans la littérature, ce qui en fait un atout stratégique pour les entreprises. Cette solution apporte une véritable valeur ajoutée dans la transition vers des installations industrielles plus sobres et résilientes, dans un contexte de volatilité des prix de l'énergie.

Etude numérique de l'influence de l'assistance par compresseur dans le cycle Absorption Heat Transformer pour valoriser des sources de chaleur fatales à basse température

Capucine Lasserre¹, Hélène Demasles¹, Romain Collignon¹

* ✉: capucine.lasserre@cea.fr

¹ CEA

Mots clés : Machine à absorption; chaleur fatale; pompe à chaleur; cycle assisté par compresseur

Résumé :

En vue de répondre aux enjeux de transition énergétique nécessaires à limiter les effets du réchauffement climatique, de nouvelles manières de valoriser les sources d'énergie disponibles doivent être mises en œuvre sans compromettre la robustesse des réseaux existants. Les transformateurs de chaleur à absorption ou Absorption Heat Transformer (AHT) sont une solution pour permettre la valorisation de la chaleur fatale à basse et moyenne température issue de rejet industriels ou de chaleur solaire. Ces machines permettent de relever la chaleur de la source fatale vers une source de plus haute température en ne nécessitant qu'une faible consommation d'énergie électrique. Bien que les performances de ces architectures soient satisfaisantes en comparaison des machines à compression mécanique de vapeur, leur gamme de fonctionnement est contrainte et deux limites se dégagent. Afin de lever ces limitations et d'étendre la gamme de fonctionnement des AHT, il est possible d'introduire un compresseur au sein du cycle. Cet ajout a pour effet de créer un troisième niveau de pression et de permettre les transferts de chaleur à des températures précédemment inatteignables. Deux positions dans le cycles AHT ont été identifiées pour y introduire un compresseur, correspondant aux deux limites de la gamme de fonctionnement. Dans cet étude, l'architecture AHT simple effet standard basé sur le couple $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ainsi que les deux architectures assistées par compresseur ont été modélisées et leurs performances ont été évaluées. L'extension de la gamme de fonctionnement ainsi que les performances des architectures ont été quantifiées et comparées à l'architecture de pompe à chaleur à compression mécanique de vapeur classique. Les résultats montrent des extensions de gamme de fonctionnement de plus de 10°C à la fois sur la température de la source froide ou sur la température chaude maximale atteignable tout en maintenant des performances énergétiques 40% supérieur à l'architecture classique.

Optimisation par Algorithme Génétique de la Performance Énergétique et du Confort Thermique d'un Système de Climatisation par Eau de Mer (SWAC)

Kanhan Sanjivy¹, Perceval Raybaud¹, Franck Lucas¹

* ✉: kanhan.sanjivy@doctorant.upf.pf

¹ Université de la Polynésie Française (UPF)

Mots clés : Climatisation par eau de mer (SWAC); Optimisation; Algorithme génétique; Performance énergétique; Confort thermique

Résumé :

La technologie SWAC (Sea Water Air Conditioning) utilise l'eau de mer profonde, naturellement froide, pour refroidir les bâtiments. Cet article présente une optimisation de ce système, basée sur un modèle de SWAC validé expérimentalement grâce l'installation de Tetiaroa. L'optimisation, ciblant la performance énergétique et le confort thermique, est précédée d'une phase de screening par la méthode de Morris pour identifier les paramètres les plus influents. Les six paramètres sélectionnés sont ensuite classés par ordre d'influence grâce à la méthode de Saltelli, et des méta-modèles des fonctions objectifs sont déduits par régression linéaire multiple. Enfin, cette optimisation multicritère, utilisant l'algorithme génétique NSGA-II, permet d'identifier une configuration optimale maximisant le coefficient de performance (COP) tout en garantissant le confort thermique. La solution optimisée permet de tripler les performances du SWAC modélisé en atteignant un COP de 85,6, contre 24,2 pour l'installation réelle. L'approche méthodologique adoptée présente un fort potentiel d'intégration dans des outils d'aide à la décision pour l'optimisation des futurs systèmes SWAC.

Méthodologie de classification des bâtiments à l'échelle du quartier au regard de leur potentiel de flexibilité énergétique

Astrid Ganswindt¹, Auline Rodler¹, Sihem Guernouti¹, Julien Ramousse², David Da Silva³, Jean-Baptiste Videau³, Valentin Gavan³

* ✉: astrid.ganswindt@cerema.fr

¹ CEREMA BPE

² LOCIE

³ ENGIE Lab CRIGEN

Mots clés : Flexibilité énergétique de la demande; Echelle quartier; Clustering; Typologies de bâtiments; Caractérisation thermique des bâtiments

Résumé :

Dans un contexte de massification des énergies renouvelables intermittentes (i.e. solaire, éolien), les bâtiments se doivent d'adapter leur consommation à une production énergétique intermittente : il s'agit de la flexibilité de la consommation ou demand-side management. A l'échelle du bâtiment, le potentiel de stockage dans la masse thermique du bâtiment constitue un gisement de flexibilité conséquent. Si l'exploitation des gisements de flexibilité des bâtiments à l'échelle du quartier permet d'augmenter le volume de stockage, elle permet aussi de développer des stratégies de maximisation du potentiel de flexibilité des bâtiments, avec notamment du foisonnement entre usages, c'est-à-dire un lissage de la demande énergétique d'un quartier du fait du caractère asynchrone des besoins des différents bâtiments, en particulier résidentiels et tertiaires. L'objectif de la thèse est d'analyser les gisements de flexibilité dans les bâtiments à l'échelle du quartier, vis-à-vis de la production de chauffage et de refroidissement, dans le but d'évaluer des stratégies d'optimisation du potentiel de flexibilité, que ce soit au niveau de la conception des bâtiments (rénovations favorisant l'inertie), ou au niveau des sources d'énergie et des systèmes énergétiques distribués ou centralisés (couplage sectoriel entre gaz, électricité et chaleur). Ici la méthodologie sera présentée : elle repose sur des techniques de clustering, qui constituent un compromis entre une modélisation détaillée d'un nombre réduit de bâtiments et une modélisation simplifiée à grande échelle. Le clustering a pour but de définir des groupes de bâtiments, et au sein de chaque groupe, des archétypes de bâtiments représentatifs des différents potentiels de flexibilité de la demande dans le quartier. Ces archétypes sont déterminés à partir des paramètres ayant le plus d'influence sur le potentiel de flexibilité, recensés à partir d'analyses de sensibilités issues de la littérature.

Simulation d'une installation solaire aérovoltaïque sur un bâtiment non résidentiel existant via TRNSYS

Benoit Liémans¹, Véronique Feldheim¹, Daniel Bougeard², Serge Russeil²

* ✉: benoit.liemans@umons.ac.be

¹ Université de Mons

² IMT Nord Europe

Mots clés : solaire photovoltaïque et thermique, PV/Ta, simulation thermique dynamique, aérovoltaïque

Résumé :

Cette communication est réalisée dans le cadre d'un projet qui consiste à étudier et modéliser les interactions entre une installation aéro-photovoltaïque améliorée et un bâtiment énergétiquement performant afin d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables (électrique et thermique dans le cas de ces panneaux hybrides) en fonction des besoins de ce dernier.

Dans le cadre de ce projet, nous avons déjà mis en avant les gains potentiels que nous pourrions obtenir par une intensification passive des échanges par générateur de vorticité dans le chenal des panneaux PV/Ta permettant d'améliorer les échanges thermiques convectifs. Sur base de ces résultats, nous avons développé notre propre module de panneau aéro-photovolta ique dans TRNSYS, logiciel de simulation thermique dynamique bien connu. Nous avons mis en évidence lors d'une publication précédente les faibles gains obtenus dans le cas de l'utilisation de cette amélioration sur un bâtiment résidentiel passif.

Afin d'étendre notre champ de recherche, nous analysons ici les résultats de simulation de l'intégration d'une installation de panneaux solaires hybrides améliorés du point de vue des échanges convectifs sur un bâtiment non résidentiel existant. Nous nous attardons en particulier sur les besoins nets en chauffage et refroidissement ainsi que sur le gain éventuel sur le bilan électrique lié à la production photovolta ique.

Nous présentons également une étude de sensibilité de ces mêmes consommation et production en fonction des orientation(s) et inclinaison(s) des panneaux ainsi que du niveau d'amélioration de l'isolation globale du bâtiment.

Analyse exergo-économique de cycles thermodynamiques pour la réfrigération de moyenne puissance

Axel Paran¹, Yacine Brahami¹, Benoit Michel², Rémi Revellin²

* ✉: axel.paran@insa-lyon.fr

¹ Tecumseh S&L

² CETHIL UMR5008, INSA Lyon

Mots clés : réfrigération; exergo-économie; exergie; production de froid

Résumé :

La production de froid pour la conservation de denrées alimentaires et le conditionnement d'air est majoritairement réalisée grâce à des cycles de compression de vapeur fonctionnant en boucle fermée avec des fluides frigorigènes, une technologie mature, bon marché et répandue. Cependant, les nouvelles lois et réglementations vont imposer de lourds changements de conception aux constructeurs de machines frigorifiques.

Plus spécifiquement, la réglementation F-Gaz impose une diminution de 80% de l'utilisation des fluides HFC d'ici 2030, à cela s'ajoute la norme Ecodesign qui vise à favoriser la production de systèmes plus efficaces énergiquement. Cette amélioration du rendement passera par de nouveaux cycles thermodynamiques, comprenant plus de composants, plus de complexité et un investissement initial plus important, le juste équilibre coût-efficacité est particulièrement difficile pour la réfrigération moyenne puissance (de 5 à 20 kW) où encore peu de travaux et d'analyse ont été effectués. Une approche couplée technico-économique est donc nécessaire pour adresser ce problème.

Dans cette étude, une analyse exergo-économique a été menée sur différents cycles à compression de vapeur, fonctionnant au R404A, R1234yf, propane, R32 et R455A.

Plusieurs couples cycle-réfrigérant offrent des améliorations de performance intéressantes pour certains points de fonctionnement. Un coût d'investissement initial plus important peut être justifié dans ces conditions.

Méthodologie de comparaison des pilotages conventionnel et par apprentissage profond en sous-station de réseaux de chaleur urbains

Boris Nérot¹, Julien Ramousse¹, Faiza Loukil², Jaume Fitó-De-La-Cruz¹, Lamia Berrah², Florine Giraud¹, Mickaël Bettinelli², Alexandre Benoit², David Corgier³

* ✉: boris.nerot@univ-smb.fr

¹ LOCIE - Université Savoie Mont Blanc

² LISTIC - Université Savoie Mont Blanc

³ MANASLU Ing.

Mots clés : réseau de chaleur;apprentissage profond;sous-station;pilotage avancé;opération;chauffage;ECS

Résumé :

Cet article s'intéresse aux sous-stations de bâtiments résidentiels et tertiaires raccordés à un réseau de chaleur. Il présente une méthodologie de comparaison des pilotages conventionnels et par apprentissage profond. Une réflexion sur les critères de performance des réseaux de chaleur permet d'abord de définir les indicateurs sur lesquels le pilotage des sous-stations a une influence.

L'exploitation de ces indicateurs par pilotage conventionnel et apprentissage profond est ensuite présentée. Cette comparaison repose sur 84 scénarios physiques introduits pour leur représentativité des cas réels rencontrés. Finalement, l'exploitation de données réelles en prédiction appuie la viabilité d'une approche apprentissage profond appliquée au pilotage des sous-stations.

Stockage thermique pour le couplage entre récupération de chaleur fatale et production d'hydrogène dans un électrolyseur à oxyde solide : étude énergétique et technico-économique

Titouan Fabiani¹, Nolwenn Le Pierrès², Patrice Tochon¹, Pierre Dumoulin³

* ✉: titouan.fabiani@etu.univ-smb.fr

¹ Genvia, SAS, France

² Laboratoire LOCIE, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, France

³ LCST, DT_CH, LITEN, CEA, France

Mots clés : Electrolyse haute température ; Electrolyse à oxyde solide ; Stockage thermique ; Chaleur Fatale ; Génération de Vapeur ; Production d'Hydrogène

Résumé :

Pour un fonctionnement efficace, un électrolyseur à oxyde solide (SOEC) a besoin d'un apport continu et stable de vapeur sèche. La génération de vapeur représente une consommation importante d'énergie thermique. Quand elle se fait grâce à un apport électrique, cela a un impact important sur l'efficacité globale de la production d'hydrogène. Dans ce travail, un système thermique est conçu pour produire de la vapeur à partir de rejets de chaleur fatale sous forme de gaz industriels. La récupération de chaleur fatale se fait au sein d'un échangeur récupérateur à faisceau de tubes et permet de chauffer une boucle d'huile thermique. La génération de vapeur à partir d'huile chaude est réalisée dans un évaporateur à plaques. Un système de stockage thermique est installé sur la boucle d'huile thermique pour maintenir une production de vapeur stable malgré les fluctuations importantes de la chaleur fatale disponible. La technologie de stockage dite thermocline dual media est choisie. De l'huile thermique et des roches sont utilisées comme matériaux de stockage sensible. Les différents composants de cette architecture thermique sont modélisés à l'aide du logiciel Dymola. Des données réelles de rejets thermiques industriels sont utilisées pour simuler en dynamique la réponse du système thermique à des variations de débit et de température des gaz industriels. Les lois de commande du système thermique sont optimisées pour permettre une production de vapeur en continu. À l'aide de ces simulations, la consommation électrique ainsi que le coût de production de la vapeur du système thermique sont comparés à ceux d'un système électrique de génération de vapeur. L'évolution de ces grandeurs en fonction de la capacité de stockage installée est également étudiée. Finalement, la mise en place du système de génération de vapeur permet une réduction de 14.3% de la consommation électrique totale du système de production d'hydrogène. Le coût de production de la vapeur est divisé par 5.

Analyse numérique de la performance des panneaux photovoltaïques flottant et impact thermiques et énergétiques des facteurs environnementaux

Davide Romagnoli¹, Martin Thebault¹, Marco Fossa², Christophe Ménézo¹

* ✉: martin.thebault@gmail.com

¹ LOCIE, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, Le Bourget du Lac

² Università degli Studi di Genova

Mots clés : Panneaux photovoltaïques flottants; transferts convectifs; conditions environnementales; production d'énergie

Résumé :

Les panneaux photovoltaïques flottants (FPV) constituent une technologie innovante dans la diversification de l'utilisation de l'énergie solaire. Leur production d'énergie ne cesse de croître d'année en année en raison de l'augmentation constante de la demande mondiale en énergie et de la nécessité d'utiliser des sources d'énergie renouvelables. Dans cette étude numérique, l'impact des lac sur la performance des systèmes photovoltaïques est étudiée à l'aide de la bibliothèque Python « pvlib » avec un focus sur :

- La température des cellules, dont certains modèles de calcul ont été analysés.
- Les coefficients d'échange thermique entre le module photovoltaïque et le milieu lacustre environnant.
- La température ambiante, qui varie en fonction de l'influence de l'eau.

L'étude vise donc à fournir une analyse de sensibilité de ces paramètres, puis à évaluer les performances des FPV par rapport aux applications terrestres traditionnelles.

Approche par cosimulation pour l'optimisation en temps réel du pilotage d'une centrale solaire existante

Capucine Lasserre¹, Nicolas Lamaison², Marc Clausse³, Pierre Garcia⁴, Valéry Vuillerme¹

* ✉: capucine.lasserre@cea.fr

¹ CEA LITEN

² CEA Liten

³ CETHIL, INSA Lyon

⁴ Newheat

Mots clés : Optimisation, Simulation numérique, Solaire thermique pour l'industrie, Stockage thermique, Pilotage

Résumé :

La production de chaleur renouvelable capable de s'adapter au besoin industriel est un enjeu clé pour réussir la transition énergétique. Dans ce contexte, la chaleur solaire pour procédé industriel est une solution prometteuse. Son développement est cependant limité par la nature intermittente de la ressource et la non-simultanéité entre la production et les besoins des consommateurs. L'utilisation d'une stratégie de pilotage avancée permet de limiter cet effet, et d'augmenter la flexibilité du système. Cette étude vise à tester une approche par cosimulation afin d'optimiser le pilotage d'une centrale solaire thermique existante. Il s'agit de la centrale de LACTOSOL assurant la production de chaleur ($< 100^{\circ}\text{C}$), pour alimenter un procédé agro-alimentaire, grâce à un champ solaire constitué de capteurs plans et un stockage thermique de type thermocline. Un modèle d'optimisation sera développé sur GAMS, afin de déterminer la trajectoire de consigne optimale à suivre pour maximiser les performances de la centrale. Un simulateur numérique, fournis par Newheat, permettra de tester l'efficacité de l'optimisation sur une représentation précise du comportement de la centrale. Les deux systèmes échangeront régulièrement selon le principe de l'horizon roulant. Cela permet d'actualiser la trajectoire de consignes au regard de perturbations mesurées ou non. Les résultats de l'optimisation seront confrontés à la stratégie de pilotage standard de la centrale afin de quantifier les gains sur la chaleur adressée au procédé. La stratégie de gestion de la surchauffe sera également modifiée afin de réduire la quantité de chaleur perdue tous en assurant la sécurité du système.

Analyse de cycle de vie d'un puits canadien : évaluation environnementale des systèmes pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments

Fouad Moufid¹, Arnaud Lapertot¹, Sébastien Visse¹

* ✉: alapertot@estp.fr

¹ ESTP

Mots clés : ACV ; Puits canadien ; Impacts environnementaux ; Indicateurs environnementaux

Résumé :

Dans un contexte de transition énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le recours à des solutions techniques innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments devient crucial. Le puits canadien, ou échangeur air-sol, est un système passif de chauffage, de ventilation et de climatisation de l'air entrant dans les bâtiments. Ce dispositif utilise la stabilité de l'énergie thermique du sol pour ajuster la température de l'air, contribuant ainsi à une réduction des besoins en chauffage et en climatisation [1].

L'objectif principal de cette étude est de réaliser une analyse de cycle de vie du puits canadien, afin de répondre aux nouvelles exigences normatives et d'évaluer ses impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie « cradle-to-grave » : de l'extraction des matières premières à sa fin de vie. L'ACV a été conduite conformément aux normes ISO 14040 et 14044 [2], en utilisant la méthodologie du cadre normatif pour évaluer les impacts environnementaux à travers différentes catégories, telles que le potentiel de réchauffement climatique (GWP), l'épuisement des ressources et l'appauvrissement de la couche d'ozone. L'analyse a été réalisée sur 4 différents matériaux afin de réaliser une comparaison des résultats : l'acier, le béton classique, le béton bas carbone et le PVC.

L'analyse environnementale a été implémentée sur Open Modelica. La procédure débute par la définition de l'objectif et du champ d'étude, où il s'agit d'identifier les frontières du système ainsi que les hypothèses de base. Ensuite, l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) est réalisé en compilant les données relatives à chaque phase du cycle de vie du puits canadien. Pour cette étape, les bases de données « INIES » et « BASE EMPREINTE (ADEME) » sont particulièrement utiles. Une fois les données collectées, on procède à l'évaluation des impacts en appliquant des modèles pour quantifier les effets environnementaux basés sur les informations d'inventaire.

Les stockages distribués pour diminuer la température d'opération des réseaux de chaleur existants

Anne-Geneviève Lemelle¹, Nicolas Lamaison², Nicolas Vasset², Jean-Michel Reneaume³, Sylvain Serra³

* ✉: anne-genevieve.lemelle@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten - Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten

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

Mots clés : Réseaux de chaleur ; stockage thermique distribué ; simulation numérique ; congestion hydraulique

Résumé :

Les réseaux de chaleur constituent une brique essentielle de la stratégie de décarbonation des secteurs résidentiel et tertiaire. Pour améliorer leur efficacité et y intégrer davantage de sources de production bas-carbone, la diminution de leur température d'opération est envisagée. Les réseaux de chaleur existants n'ayant pas été dimensionnés pour cette évolution, plusieurs éléments doivent être mis à niveau. Entre autres, certaines conduites ne peuvent faire face à l'augmentation de débit que cela implique. Plusieurs travaux réalisés dans d'autres contextes ont montré que les stockages de chaleur distribués sur un réseau permettent de diminuer localement le débit dans les conduites. Cet article vise à explorer cette perspective dans le contexte de mise à niveau d'un réseau. A l'aide du logiciel DistrictLab-H Simulation Studio, un réseau de chaleur simple composé de seulement trois consommateurs est mis en place avec un dimensionnement calculé pour une certaine température d'opération. Cette température d'opération est ensuite diminuée puis deux solutions de mise à niveaux sont testées, pour comparaison. La première consiste à ajouter des stockages distribués en aval des conduites dans lesquelles le débit est trop élevé. La seconde, plus classique mais pas toujours envisageable dans la réalité, est de remplacer les conduites en question. Ces deux solutions se révèlent concluantes et sont caractérisées en termes de performances technico-économiques.

Simulation numérique du Stirling GPU3 avec gestion améliorée des sauts de section

Israa Barakat¹, Eric Albin¹, Shihe Xin¹

* ✉: israa.barakat@insa-lyon.fr

¹ Centre d'énergétique et de thermique de Lyon (CETHIL), INSA Lyon

Mots clés : Simulation numérique, Machines thermiques régénératives, Stirling, Sauts de section

Résumé :

Les machines thermiques régénératives, telles que les machines Stirling, sont couramment utilisées en cryogénie et en cogénération d'énergie avec du potentiel pour des applications de trigénération d'énergie. Cette étude se concentre sur la modélisation d'un moteur Stirling GPU3, configuration documentée par des données expérimentales, avec un modèle numérique de la littérature dont la gestion des sauts de section a été améliorée. Ce modèle unidimensionnel est basé sur la conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement dans le fluide ainsi que sur la conservation de l'énergie dans les solides (parois et milieux poreux). Une discrétisation par volumes finis est associée à un schéma temporel implicite permettant d'assurer la stabilité.

L'amélioration de la gestion de la géométrie est investiguée dans un cas simple de saut de section puis dans le cas du moteur Stirling. Ces simulations confirment l'efficacité de ce modèle à décrire les transferts de chaleur dans ce type de système. Ces outils de modélisation développés constituent une base pour simuler de nouvelles configurations de machines régénératives, ouvrant la voie à des solutions de trigénération d'énergie plus efficaces que la cogénération.

Etude expérimentale et numérique d'un capteur solaire à tubes sous vide avec stockage intégrant un échangeur

Mehdi Salah¹, Hervé Noël¹, Adrien Fuentes¹, Diane Le Roux¹, Anthony Magueresse¹, Liquun Feng², Thibaut Colinart¹

* ✉: mehdi.salah@univ-ubs.fr

¹ Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL

² Feng Technologies SAS

Mots clés : Solaire Thermique; Tubes sous vide; TRNSYS; Simulation; Validation Expérimentale

Résumé :

Les capteurs solaires à tubes sous vide (CS-TSV) sont une technologie solaire thermique mature, assurant une bonne performance y compris dans des conditions climatiques défavorables. Une grande partie des systèmes CS-TSV commercialisés se présentent sous un assemblage Water-in-Glass (WiG), où l'eau chaude solaire circule par effet thermosiphon entre les TSV et un réservoir de stockage intégré. Ces systèmes de configuration simple sont largement répandus pour la production d'eau chaude sanitaire, mais beaucoup moins pour des applications de chauffage. Récemment, des modèles innovants de CS-TSV ont intégré un échangeur en serpentin à l'intérieur du réservoir de stockage afin de séparer l'eau morte solaire du fluide caloporteur et d'étendre les champs d'utilisation des CS-TSV.

Ce travail présente dans un premier temps une étude expérimentale réalisée avec ce type de capteur. L'installation comprend 14 CS-TSV assemblés en série, totalisant une surface de captage de 41 m² et un volume de stockage intégré de 4,2 m³. Cette installation est destinée au chauffage d'un bâtiment d'élevage situé au Nord-Ouest de la France. Une instrumentation permet de collecter les données météo, les températures dans différents capteurs et le débit circulant dans les échangeurs. Une première analyse des résultats montre que des taux de conversion solaire de 48 % peuvent être atteints.

En parallèle, un modèle TRNSYS de l'installation est développé. Un CS-TSV est modélisé à l'aide des Type 71-IAM et 1533 et l'ensemble des modèles unitaires de CS-TSV sont assemblés en série, conformément à l'installation expérimentale. Le comportement thermique de l'installation est simulé pour différentes conditions d'irradiance solaire et différents débits de soutirage du fluide caloporteur. Un bon accord est observé entre les simulations et les données expérimentales, avec une erreur moyenne absolue inférieure à 10 % pour l'ensemble des températures et inférieure à 15 % pour l'énergie cumulée.

Optimisation multiobjectif de la cuisson d'un produit céréalier

Adrien Fuentes¹, Patrick El Helou¹, Pascal Le Bideau¹, Patrick Glouannec¹

* ✉: adrien.fuentes@univ-ubs.fr

¹ Université de Bretagne Sud

Mots clés : optimisation, multiphysique, cuisson

Résumé :

Ce travail est consacré au développement d'une procédure d'optimisation dédiée au pilotage d'un procédé de cuisson de produit céréalier. La stratégie adoptée repose sur un couplage entre un modèle multiphysique représentatif de l'étape de cuisson et un algorithme d'optimisation multiobjectif. Le modèle numérique utilisé dans cette procédure a été préalablement validé pour une consigne de température fixe par confrontation entre résultats numériques et séquences expérimentales. La procédure d'optimisation mise au point utilise ce modèle numérique afin de minimiser plusieurs fonctions objectifs représentant des critères de qualité de produit en fin de cuisson (teneur en eau, déformation et coloration) et des critères industriels (durée de cuisson et indicateur énergétique). Le but de cette procédure est d'identifier, sous contraintes, une séquence de consignes de température de cuisson permettant de minimiser simultanément l'ensemble de ces critères. Le cadre multiobjectif de ce problème d'optimisation nécessite de définir une politique de sélection pour le choix de la séquence optimale de pilotage de la température de cuisson. Les résultats obtenus avec cet outil sont mis en œuvre expérimentalement lors de cuissons à consigne de température variable, permettant de valider l'ensemble de la procédure d'identification développée.

Analyse topologique des réseaux de chaleur nationaux

Martin Badet–Rialhe¹, Julien Ramousse², Laurent Vuillon³, Aurore Lomet⁴, Boris Nérot²

* ✉: martin.rialhe-badet@univ-smb.fr

¹ LAMA, LOCIE

² LOCIE

³ LAMA

⁴ CEA

Mots clés : réseaux de chaleur; analyse topologique; classification; flexibilité

Résumé :

Face au changement climatique, nous assistons à un développement rapide des réseaux de chaleur, à la fois par la création de nouveaux réseaux mais aussi par l'extension et l'évolution des réseaux de chaleur existants vers les basses températures, se traduisant par une multiplication et une diversification des sources de production de chaleur. L'ensemble des réseaux de chaleur nationaux sont caractérisés par des topologies diverses : ramifications, maillages... L'objectif de ce travail est de caractériser la topologie des réseaux de chaleur dans le but de pouvoir analyser et mieux comprendre leurs évolutions topologiques.

L'analyse porte sur l'ensemble des réseaux nationaux renseignés dans les bases de données opendata (FCU, BNDB, SDES), soit 930 réseaux. Après une étape de prétraitement pour reconstruire ou éliminer les données peu fiables (584 réseaux retenus), il est possible d'extraire et de déterminer les caractéristiques techniques telles que l'âge du réseau, la taille (en mètres linéaires et en énergie distribuée), la densité linéique, la diversité des sources de chaleur (en puissance et en énergie) et leur taux de charge, le taux d'ENR ainsi que le tracé. Les techniques d'analyse topologique mises en œuvre permettent en particulier le calcul des dimensions fractales globale et locales et l'identification du nombre de cycles. A partir des caractéristiques retenues, les réseaux sont classés par une étape de clustering, afin d'identifier des tendances générales. Enfin l'analyse causale vise à expliquer les tendances observées et déterminer les liens causaux entre les différents indicateurs.

Ce travail vise à analyser les impacts des caractéristiques techniques sur la topologie des réseaux de chaleur pour planifier les futures créations et extensions de réseaux de chaleur, en vue d'aborder la question de leur flexibilité (diversité des sources, maillage et inertie).

Développement de schémas RC comme outil de cartographie pour les besoins en chaud et en froid à l'échelle du bâtiment

Antoine Dumont¹, Véronique Feldheim¹, Paul Lybaert¹

* ✉: antoine.dumont@umons.ac.be

¹ UMONS, Faculté Polytechnique, service de Thermique et Combustion

Mots clés : modèles RC; bâtiments; approche boîte grise

Résumé :

En 2024, le secteur résidentiel représente 25,8 % de la consommation finale d'énergie et 18,1 % de la consommation intérieure brute d'énergie dans l'Union européenne. Ce secteur continue d'être l'un des principaux responsables de la consommation énergétique. De nombreuses études et expériences se concentrent sur l'optimisation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel. Elles passent notamment par la modélisation thermique des bâtiments qui est essentielle pour comprendre et optimiser au mieux les besoins énergétiques en chaud et en froid. Dans notre recherche, nous développons des modèles « boîte grise » basés sur des schémas résistances-capacités (RC), dont les paramètres peuvent être déterminés simplement à partir de données générales limitées sur le bâtiment (année de construction, composition des parois, typologie, etc.). L'objectif est donc de disposer de schémas permettant de représenter les dynamiques thermiques de manière simplifiée mais efficace avec des paramètres gardant une signification physique. L'identification des paramètres (résistances et capacités thermiques) est réalisée à partir de données générées par une simulation « boîte blanche » (logiciel TRNSYS) servant de référence fiable. Cette identification garantit que les schémas RC reproduisent avec précision les comportements thermiques observés, avec une très bonne précision globale pour la température intérieure (83 % pour le meilleur schéma). Il convient ensuite de relier les paramètres identifiés aux caractéristiques physiques réelles du bâtiment pour être capable d'élaborer les schémas RC et d'en retirer les consommations en chaud et en froid sans avoir besoin de réaliser les simulations détaillées au préalable. À terme, cette méthodologie doit nous permettre de proposer une cartographie des besoins en chaud et en froid à une échelle plus globale, celle du quartier, servant au dimensionnement et à la gestion opérationnelle des systèmes énergétiques.

Sobriété énergétique et optimisation intégrée des stratégies de rénovation et de gestion des bâtiments de bureaux en France : impacts énergétiques, économiques et environnementaux

Adnane M'Saouri El Bat¹, Antoine Leconte², Jean-Gabriel Winkler¹, Ophélie Ouvrier-Bonnaz²

* ✉: antoine.leconte@cea.fr

¹ PANDO2

² CEA LITEN

Mots clés : Bâtiments tertiaires, sobriété, analyse de sensibilité, métamodèle, réseaux de neurones

Résumé :

Face aux défis de la réduction des impacts environnementaux, la sobriété énergétique des bâtiments tertiaires s'impose comme une priorité stratégique. Ce travail présente une méthodologie intégrée combinant simulations thermiques dynamiques, analyse de sensibilité et intelligence artificielle pour optimiser simultanément les stratégies de rénovation et de gestion des usages des bureaux. Elle offre un cadre scientifique robuste et pragmatique pour guider les gestionnaires et décideurs vers des solutions durables.

L'approche repose sur l'analyse de 11 paramètres clés, couvrant les caractéristiques thermiques de l'enveloppe, les températures de consigne, la ventilation et les horaires de fonctionnement du chauffage. L'analyse de sensibilité de Sobol, réalisée sur la base des besoins de chauffage simulés avec TRNSYS 18, a identifié les principaux leviers d'optimisation. Les propriétés thermiques de l'enveloppe et les températures de consigne se sont révélées déterminantes, tandis que des interactions significatives entre la ventilation et la gestion des horaires de chauffage ont mis en évidence la nécessité d'une approche systémique et coordonnée.

Un modèle d'intelligence artificielle basé sur des réseaux de neurones, formé à partir de 50 000 simulations TRNSYS 18, a été développé pour prédire avec précision les impacts énergétiques, économiques et environnementaux des diverses configurations testées. Cet outil permet d'évaluer efficacement des milliers de scénarios, offrant ainsi un support décisif à l'optimisation et la prise de décision.

Les résultats montrent qu'en combinant des rénovations thermiques ciblées avec une gestion sobre du chauffage et de la ventilation, il est possible de réduire la consommation énergétique jusqu'à 40 %. Cette réduction s'accompagne d'une diminution significative des coûts opérationnels et des émissions de CO₂.

Dimensionnement optimal de systèmes énergétiques solaires hybrides produisant de la chaleur et de l'électricité pour les procédés industriels

Simon Caron¹, Valéry Vuillerme¹

* ✉: simon.caron@cea.fr

¹ CEA LITEN

Mots clés : Système hybride; Energie solaire; Optimisation

Résumé :

1. Introduction

L'énergie du secteur industriel représente 32% de la consommation mondiale : plus de 70% de cette énergie provient de la chaleur. La majeure partie de la demande énergétique industrielle requiert une température inférieure à 400 °C. Elle est à ce jour encore principalement couverte par les combustibles fossiles, comme le gaz naturel.

L'efficacité énergétique, l'électrification des procédés ainsi que l'intégration intelligente des énergies renouvelables et du stockage d'énergie sont nécessaires pour une décarbonation rapide de la demande énergétique industrielle d'ici 2050. La question centrale de l'intégration de l'énergie solaire dans les procédés industriels est abordée dans le cadre du projet SHIP4D (Programme PEPR SPLEEN) [1].

2. Optimisation du système hybride

Le système énergétique hybride intègre différentes briques technologiques, notamment i) un éventail de technologies solaires (photovoltaïque, solaire thermique, technologie PVT, solaire à concentration CST), ii) des technologies de stockage (électrique et thermique) iii) des technologies de conversion de l'électricité en chaleur (chaudière électrique, pompe à chaleur) et iv) une source de chauffage d'appoint (gaz naturel, biomasse, chaleur fatale).

Le logiciel PERSEE, développé par le CEA, permet d'analyser le système hybride d'un point de vue techno-économique et environnemental, afin d'optimiser son dimensionnement et sa stratégie de contrôle, en appliquant la programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP). La fonction de coût prend en compte la valeur actuelle nette (VAN) du projet et peut inclure diverses contraintes définies par l'utilisateur.

Références

[1] <https://www.pepr-spleen.fr/projet/ship4d/>

Étude numérique de l'intensification des échanges thermiques dans un stockage de chaleur latent par l'usage combiné de graphite naturel expansé compressé, ailettes et mélangeurs statiques

Soumaya Ait Moula¹, Mariam Jadal¹, Jérôme Soto², Xavier Py³, Mohamed Balli⁴

* ✉: soumaya.aitmoula@uir.ac.ma

¹ LERMA, College of Engineering & Architecture, International University of Rabat

² Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes-Institut Catholique d'Arts et Métiers

³ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

⁴ LERMA, Engineering & Architecture, International University of Rabat-Department of Mechanical Engineering, Faculté de Génie: Université de Sherbrooke

Mots clés : Efficacité énergétique ; Chaleur fatale ; Matériaux à Changement de Phase (MCP) ; Conductivité thermique ; Ailettes ; Mélangeurs statique.

Résumé :

la chaleur fatale peut être stockée à l'aide de systèmes de stockage thermique puis restituée ultérieurement. Au fil des années, de nombreuses techniques et méthodes de conception d'échangeur-stockage ont été développées pour répondre à des exigences de performance toujours plus élevées. Parmi celles-ci, l'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) se distingue par leur densité énergétique élevée, bien que leur faible conductivité thermique entraîne une puissance de charge et de décharge limitée. L'intégration d'ailettes ou de graphite naturel expansé permet d'augmenter la surface d'échange ainsi que la conductivité thermique apparente du stockage thermique. Bien que de nombreuses études aient été menées sur ce sujet, les améliorations proposées restent insuffisantes pour répondre pleinement aux exigences industrielles dans certaines applications dans lesquelles le temps de charge et décharge requis est très court. Par exemple, les temps caractéristiques de stockage/déstockage pour certaines applications dans les procédés en plasturgie sont de l'ordre de la minute. Les performances des systèmes actuels, en termes de capacité de stockage, de puissance thermique et de compacité, nécessitent encore une amélioration significative pour atteindre un niveau d'efficacité conforme à ces besoins spécifiques.

Cet article présentera une étude numérique montrant l'impact de chacun de ces dispositifs d'intensification des transferts de chaleurs, graphite naturel expansé, ailettes et mélangeurs statiques, avec la possibilité de combiner les trois solutions.. L'association de ces trois techniques d'amélioration pour le stockage thermique constitue une approche originale. L'étude paramétrique portera notamment sur la conductivité thermique, l'épaisseur et le pas des ailettes, l'orientation et la densité de la matrice de graphite naturel expansée. Pour une configuration donnée, l'influence de l'ajout d'un mélangeur statique en régime laminaire et turbulent sur les performances.

Conception d'un foyer de cuisson simple paroi amélioré utilisé au Bénin

Arthur Sanya¹, Gérard Honahonde², Wilfrid Adihou²

* ✉: olaotan285@gmail.com

¹ UNSTIM/ BENIN

² UNSTIM

Mots clés : Performance, sécurité, modélisation, foyer simple paroi, température, conductivité thermique

Résumé :

Dans les pays en voie de développement, la demande d'énergie de cuisson, surtout la biomasse, ne cesse d'augmenter avec la croissance de la population. L'utilisation répandue de foyers de cuisson inefficaces contribue également à celle-ci. Ces foyers n'assurent pas la sécurité des utilisateurs et contribuent au dérèglement climatique. Dans cette étude, les performances d'un foyer amélioré utilisé au Bénin sous le nom de foyer "simple paroi" sont évaluées. Sa modélisation et son profil de température révèlent que les parois extérieures s'échauffent jusqu'à 800K, une valeur dépassant celle sécuritaire. Aussi, plusieurs paramètres tels que l'excès d'air, la hauteur de la cheminée, la conductivité thermique, l'épaisseur, le diamètre et la hauteur de la chambre de combustion, ont-ils influencé les performances du foyer. Mieux, il existe pour une configuration ou une dimension du foyer cylindrique donnée, une conductivité thermique critique (matériau) au-delà de laquelle il faut énormément dépenser en épaisseur avant de réduire les pertes. Cette valeur avoisine dans la présente étude les 18 W/m.K. Les modifications apportées ont amélioré sa performance du point de vue énergétique et sécuritaire et répondu au cahier des charges. Le test du prototype dont le coût de réalisation s'élève à 47 350 FCFA confirme les résultats avec une efficacité de 31,7% et une température de 337,55K des parois extérieures et les utilisateurs sont protégés du monoxyde de carbone (CO) via le système de régulation.

Refroidissement direct d'Electronique de Puissance par l'utilisation de matériaux à changement de phase

Thomas Lemonnier¹, Hubert Lescot², Cyril Buttay³, Romuald Rulière¹

* ✉: thomas.lemonnier@insa-lyon.fr

¹ CETHIL

² Renault Group AMPERE

³ Laboratoire Ampère

Mots clés : changement de phase ; refroidissement ; électronique de puissance ; conductivité thermique

Résumé :

Ces travaux portent sur la gestion thermique de composants d'électronique de puissance dans les véhicules électriques, et plus spécifiquement sur le cas de l'onduleur, dont le rôle est de convertir le courant continu venant de la batterie en un courant alternatif pour les moteurs. Lors de son fonctionnement, un onduleur dissipe de la chaleur, qui est évacuée grâce à un système de refroidissement liquide.

Lors de comportements transitoires (comme une accélération dans le cas d'une application automobile), les pertes de puissances peuvent être jusqu'à deux fois plus importante qu'en régime continu. L'idée de ces travaux est d'intégrer un système passif de gestion thermique à base de matériaux à changement de phase (MCP) pour venir compléter le système de refroidissement principal lors de ces régimes transitoires.

Un amortisseur thermique à base de MCP permet le stockage par chaleur latente de l'énergie dissipée lors des phases transitoires, pour ensuite l'évacuer grâce au système de refroidissement principal lors des phases continues.

Le verrou majeur de l'utilisation des MCP dans cette application est leur faible conductivité thermique. En se basant sur l'état de l'art, une solution identifiée permettant l'amélioration de la conductivité de l'amortisseur thermique serait de créer un hybride MCP-matériau à forte conductivité thermique. La localisation de l'amortisseur thermique devra également être étudiée, puisque celui-ci devra être placé au plus près des puces, sans gêner leurs connexions électriques ni dégrader le refroidissement en régime nominal.

Modélisation et optimisation d'un système multi-énergies pour le chauffage urbain

Safae El Mrabet¹

* ✉: safae7010@gmail.com

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour

Mots clés : District heating system, modeling, simulation, renewable energies, distribution, storage

Résumé :

The building sector is one of the most energy-intensive, consuming up to 45

District heating systems (DHS) represent an advantageous centralized solution for reducing both energy consumption and GHG emissions. Since their appearance in the 19th century, these systems have progressively established in many cities around the world as key infrastructures, offering a collective and efficient approach to satisfying the thermal needs of dense urban areas.

The integration of renewable energies in DHS is part of a sustainable approach, with the main aim being to reduce energy consumption from fossil sources and promote the use of renewable heat/cooling. However, due to the intermittent nature of these renewable sources, the use of thermal energy storage systems is an essential component in ensuring efficient operation of these DHS.

This work proposes an innovative approach that combines renewable heat production with optimal distribution and thermal storage based on a stratified tank.

The focus is on the development of a dynamic modeling tool for a green heat system for collective heating/ cooling of buildings, to ensure renewable heat production, modeling and dynamic simulation of heat losses and loads in the system, as well as sensible storage, ensuring an efficient response to the needs of end-users. This numerical tool will be capable of dimensioning and predicting the dynamic operation of DHS under different operating conditions.

Modélisation d'une chaudière de récupération avec changement de phase et calcul du coefficient d'échange

Louis Mougenot¹, Alexis Sesmat², François Lanzetta³, Philippe Baucour⁴

* ✉: louis.mougenot@neext.email

¹ NEEXT ENGINEERING / Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST

² NEEXT ENGINEERING

³ Université Marie et Louis Pasteur CNRS, Institut FEMTO-ST

⁴ Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST

Mots clés : Echangeur Thermique, Modélisation, Dimensionnement

Résumé :

Mougenot Louis[1,2], Sesmat Alexis[1], , Baucour Philippe[2], Lanzetta François [2]

[1] Neext Engineering, Belfort

[2] Institut FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Belfort

Cette étude explore la modélisation d'une chaudière industrielle (100 MW) de récupération, tout en considérant le coefficient d'échange. Deux cas de chaudières sont modélisés : l'un avec un fluide à changement de phase et l'autre avec plusieurs étages de pression qui co-existent dans la chaudière. La modélisation repose sur une discrétisation des échangeurs pour caractériser au mieux le changement de phase, en utilisant les méthodes du nombre d'unités de transfert et d'efficacité ($NTU-\varepsilon$) et de la différence de température logarithmique moyenne (DTLM).

Approche par cosimulation pour l'optimisation en temps réel du pilotage d'une centrale solaire existante

Capucine Lasserre¹, Nicolas Lamaison², Marc Clausse³, Pierre Garcia⁴, Valéry Vuillerme¹

* ✉: capucine.lasserre@cea.fr

¹ CEA LITEN

² CEA Liten

³ CETHIL, INSA Lyon

⁴ Newheat

Mots clés : Optimisation, Simulation numérique, Solaire thermique pour l'industrie, Stockage thermique, Pilotage

Résumé :

La production de chaleur renouvelable capable de s'adapter au besoin industriel est un enjeu clé pour réussir la transition énergétique. Dans ce contexte, la chaleur solaire pour procédé industriel est une solution prometteuse. Son développement est cependant limité par la nature intermittente de la ressource et la non-simultanéité entre la production et les besoins des consommateurs. L'utilisation d'une stratégie de pilotage avancée permet de limiter cet effet, et d'augmenter la flexibilité du système. Cette étude vise à tester une approche par cosimulation afin d'optimiser le pilotage d'une centrale solaire thermique existante. Il s'agit de la centrale de LACTOSOL assurant la production de chaleur ($< 100^{\circ}\text{C}$), pour alimenter un procédé agro-alimentaire, grâce à un champ solaire constitué de capteurs plans et un stockage thermique de type thermocline. Un modèle d'optimisation sera développé sur GAMS, afin de déterminer la trajectoire de consigne optimale à suivre pour maximiser les performances de la centrale. Un simulateur numérique, fournis par Newheat, permettra de tester l'efficacité de l'optimisation sur une représentation précise du comportement de la centrale. Les deux systèmes échangeront régulièrement selon le principe de l'horizon roulant. Cela permet d'actualiser la trajectoire de consignes au regard de perturbations mesurées ou non. Les résultats de l'optimisation seront confrontés à la stratégie de pilotage standard de la centrale afin de quantifier les gains sur la chaleur adressée au procédé. La stratégie de gestion de la surchauffe sera également modifiée afin de réduire la quantité de chaleur perdue tous en assurant la sécurité du système.

Analyses thermodynamiques statiques de cycles thermochimiques hybrides à éjecteur pour la valorisation en froid de chaleur basse température

Doha Kafeh¹, Régis Olivès², Maxime Perier-Muzet²

* ✉: doha.kafeh@univ-perp.fr

¹ Promes et UPVD

² Promes, UPVD

Mots clés : Chaleur fatale; Rejets thermiques industriels; Valorisation énergétique; Cycle thermochimique; Éjecteur; Production de froid; Basse température; Transition énergétique; Stockage thermique

Résumé :

Les rejets thermiques industriels, appelés chaleurs fatales, représentent une source d'énergie considérable encore largement sous-exploitée qui représente en France environ 110 TWh dont la moitié à des températures inférieures à 100°C . L'ADEME souligne leur potentiel dans la transition énergétique et la décarbonation de l'industrie. Dans ce contexte, cette étude s'intéresse au développement de systèmes hybrides de conversion et de stockage d'énergie thermique capables de valoriser ces rejets pour produire du froid.

Le travail porte sur la conception et l'analyse de cycles combinant des éjecteurs et des cycles thermochimiques, à travers trois configurations innovantes :

*Configuration à décomposition assistée : un éjecteur est intégré entre le réacteur et le condenseur. Cette architecture permet de réduire la température de décomposition du réacteur, permettant de valoriser des sources thermiques à basse température.

*Configuration à synthèse assistée : l'éjecteur est positionné entre l'évaporateur et le réacteur en phase de synthèse pour réduire la pression d'évaporation afin d'abaisser la température de production de froid. L'abaissement de la température du froid produit.

*Configuration combinée : deux éjecteurs sont intégrés, respectivement en phase de décomposition et de synthèse.

Ces configurations ont des performances énergétiques inférieures au cycle de base, mais elles élargissent sensiblement la gamme de températures opératoires des cycles thermochimiques ce qui permet d'envisager diverses applications industrielles.

Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un modèle basé sur les bilans de masse et d'énergie avec des écarts de température fixes pour chaque composant. Ce modèle est résolu avec le logiciel EES. Ces simulations confirment la faisabilité thermodynamique des différentes configurations et permettent d'orienter le choix des réactifs utilisés en fonction des cas d'application

Pilotage expérimental de la demande d'un bâtiment relié à un réseau de chaleur

Théau Le Guern¹, Nicolas Vasset¹, Antoine Piguet¹

* ✉: theau.leguern@cea.fr

¹ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Mots clés : Gestion de la demande ; Réseaux de chaleur ; Expérimental ; Thermique

Résumé :

La gestion de la demande est un levier de flexibilité mobilisable pour une opération efficace et résiliente des réseaux de chaleur, qui a toutefois été peu utilisé jusqu'à présent en France. Le CEA et la Compagnie de Chauffage de Grenoble ont mené des travaux expérimentaux visant à étudier le délestage en puissance d'un bâtiment moderne, le Salammbô, relié au réseau de chaleur de Grenoble et instrumenté pour mener à bien ces campagnes d'essais. Ces travaux ont conduit à l'établissement d'une méthodologie de pilotage de la demande à l'échelle locale sur la base de règles expertes. Ils ont également permis de caractériser le potentiel de flexibilité offert par l'enveloppe du bâtiment, à travers une relation entre la chaleur non consommée lors du délestage et la baisse de la température ambiante. Les travaux incluent une gestion dédiée du phénomène de rebond post-délestage.

Dans de nombreux cas, et particulièrement dans le paysage des réseaux de chaleur français, le circuit secondaire est utilisé pour satisfaire à la fois une demande en chauffage et en eau chaude sanitaire (ECS). Une limitation de la puissance délivrée à la sous-station impacte donc ces deux systèmes. La température de l'ECS étant strictement réglementée, le potentiel de délestage (et notamment la puissance délivrée à la sous-station) est alors fortement modifié. Les travaux en cours se concentrent donc sur la recherche d'une méthode de délestage permettant de limiter au maximum la puissance fournie à la sous-station lors d'une période critique, tout en satisfaisant les contraintes d'opération ECS. Des résultats expérimentaux prometteurs, permettant de dégager une méthodologie de mise en œuvre, sont présentés.

Ces travaux sont actuellement poursuivis à la fois pour généraliser l'approche à d'autres sous-stations du parc de Grenoble, et d'autre part en incluant une approche de pilotage optimal prédictif (MPC) sur ce même bâtiment Salammbô.

Récepteurs solaires à lit fluidisé : analyse thermo-mécanique d'un tube absorbeur en carbure de silicium

Oussama Amoud¹, Quentin Falcoz¹, Reine Reoyo-Prats¹, Olivier Faugeroux²

* ✉: oussama.amoud@cnrs.fr

¹ Université de Perpignan/PROMES

² Université de Perpignan

Mots clés : Carbure de silicium (SiC) ; Lit fluidisé ; Récepteur solaire ; Simulation numérique ; Thermomécanique

Résumé :

La technologie solaire à concentration (CSP) suscite un intérêt croissant en raison de son potentiel à produire l'énergie renouvelable à grande échelle. Pourtant, plusieurs concepts restent à développer. Le projet SiCSun vise à optimiser les systèmes CSP en intégrant un récepteur solaire tubulaire en carbure de silicium (SiC) utilisant un lit de particules fluidisées comme fluide caloporteur. Le SiC est choisi pour sa résistance thermique élevée, lui permettant de fonctionner au-delà de 1000°C.

L'étude se concentre sur le comportement thermo-mécanique de ce récepteur. Le dispositif expérimental comprend un tube en SiC d'un mètre de long et 45 mm de diamètre interne, placé dans une cavité isolée exposée à un flux solaire concentré de 600 kW/m². Les particules fluidisées circulant à l'intérieur du tube assurent le transfert de chaleur. Deux scénarios seront testés pour la température d'entrée des particules : température ambiante, et particules préchauffées à 300°C. Les performances du SiC seront comparées à celles d'un autre matériau étudié précédemment.

Avant les essais, des simulations numériques sont réalisées avec Code-Aster/SALOME pour anticiper le comportement du matériau. Les premiers résultats montrent un déplacement d'environ 1 cm sous flux solaire intense, sans dépasser les limites élastiques du SiC, validant ainsi sa tenue mécanique. D'autres simulations sont menées en faisant varier des paramètres comme la température d'entrée, le débit de particules ou la répartition du flux solaire. Cette analyse paramétrique permet d'explorer différentes conditions opératoires pour mieux comprendre l'influence de chaque facteur sur le comportement global du matériau, en vue d'optimiser le protocole expérimental.

Modélisation d'une géométrie spirale pour application de batterie

Houda Aboulfalah¹

* ✉: houda.aboulfalah@uir.ac.ma

¹ LEMTA

Mots clés : Gestion thermique , Batteries Li-ion , Conductivité thermique , Géométrie spirale , Modélisation

Résumé :

La gestion thermique des batteries Li-ion cylindriques constitue un enjeu majeur pour améliorer leur performance, leur sécurité et leur durabilité. Dans cette optique, cette thèse s'intéresse à la modélisation et à la gestion de la chaleur dans ces batteries, en combinant une approche expérimentale et numérique, avec un accent particulier sur l'identification des paramètres thermiques clés tels que la conductivité thermique et la capacité thermique de ces cellules.

La première partie du travail consiste à caractériser la conductivité thermique anisotrope des cellules cylindriques. La structure interne en spirale (ou enroulement type jelly roll) introduit une complexité supplémentaire dans la modélisation, avec des comportements de conduction différents selon les directions radiale, axiale et tangentielle à l'enroulement. Afin d'évaluer l'impact de cette géométrie sur les transferts thermiques, de premières simulations en régime permanent ont été menées. Un modèle 2D représentant la spirale a été développé sous COMSOL, puis comparé à un modèle 1D cylindrique . Les résultats suggèrent que, pour les cellules contenant un grand nombre de spires, une simplification par un modèle cylindrique reste acceptable, tout en facilitant considérablement les calculs.

Cette même partie de la thèse porte également sur la possibilité de représenter la cellule par modèle homogène, dans le sens radial, avec des propriétés thermiques équivalentes pour l'ensemble des couches de la cellule. Pour ce faire, nous réalisons des simulations en régime transitoire pour une spirale, un cylindre multicouche et un autre avec une seule couche équivalente. Ces simulations numériques et par quadripôles thermiques, permettent de vérifier la faisabilité de l'approche homogène pour une future caractérisation expérimentale. La comparaison est en outre effectuée en termes d'impédance et de transmittance thermiques, pour orienter le choix de la méthode expérimentale vis-à-vis de l'incertitude de mesure.

Prototypage d'une Pompe à Chaleur Haute Température pour utilisation dans les Batteries Carnot Intégrées Thermiquement

Titouan Janod¹, Yacine Brahami², Vincent Lemort¹

* ✉: titouan.janod@uliege.be

¹ Université de Liège

² Tecumseh Europe Sales & Logistics, Engineering Department

Mots clés : Batterie de Carnot;Pompe à chaleur;Compresseur;Haute température;EES;Prototype

Résumé :

Dans une logique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la transformation des systèmes énergétiques implique le fait de devoir stocker de larges quantités d'électricité. Les batteries de Carnot sont considérées comme une des solutions pouvant permettre de répondre à ce besoin. Le projet Européen SEHRENE se concentre sur les batteries de Carnot intégrées thermiquement à travers trois études de cas et un prototype de laboratoire. Ce prototype sera constitué d'un stockage thermique latent et d'un Cycle Organique de Rankine, fabriqué par une équipe du CEA Grenoble, et d'une pompe à chaleur haute température, fabriquée à l'Université de Liège. Ce poster décrit les avancements réalisés jusqu'ici sur le dimensionnement de la pompe à chaleur haute température. Cette pompe à chaleur affichera un design classique : un compresseur, un évaporateur, un condenseur et une vanne de détente. Le compresseur utilisé sera un compresseur à piston. Un modèle semi-empirique du compresseur a été incorporé au modèle général du cycle développé sur EES. Une fois construite, l'Université de Liège étudiera le couplage pompe à chaleur/stockage thermique latent. Elle devra atteindre une température de condensation d'environ 130°C afin de fondre le matériau à changement de phase du stockage thermique. Le compresseur à piston qui sera utilisé n'étant normalement pas prévu pour monter à ces températures, différentes solutions ont été étudiées pour permettre ces réalisations.

Modélisation dynamique d'un stockage souterrain à faible profondeur pour valoriser l'énergie solaire

Diane Le Roux¹, Hervé Noël¹, Adrien Fuentes¹, Thibaut Colinart¹

* ✉: diane.le-roux@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, IRDL

Mots clés : Stockage thermique saisonnier ; capteurs thermiques ; analyse de sensibilité ; échangeur de chaleur souterrain horizontal ; simulation

Résumé :

Pour limiter le réchauffement climatique et soutenir la transition énergétique, l'adoption de systèmes énergétiques efficaces et respectueux de l'environnement est cruciale. Les dispositifs de stockage d'énergie thermique suscitent un intérêt croissant pour compenser l'intermittence des énergies renouvelables.

Ce projet, fruit d'une collaboration entre le laboratoire IRDL et Feng Technologies, vise à optimiser un système comprenant des capteurs thermiques brevetés qui récupèrent la chaleur solaire, même par temps nuageux. Chaque capteur est directement relié à un réservoir de 300 L d'eau, permettant un stockage thermique à court terme, sur plusieurs heures ou jours, tout évitant les problèmes de gel de l'eau. Afin de gérer les surchauffes en période de forte irradiance, un dispositif non pressurisé de dissipation thermique évacue la vapeur produite à l'air libre. L'objectif est de stocker cet excédent de chaleur estivale pour préchauffer le caloporteur en automne ou en hiver. Ce projet vise à résoudre le problème de surchauffe lié à l'accumulation d'eau chaude, en stockant la chaleur excédentaire entre mai et septembre dans un volume isolé au sol via un échangeur de chaleur. Les dispositifs de stockage saisonnier à faible profondeur et utilisant de l'eau et des matériaux naturels comme le sable réduisent les coûts et l'encombrement, car n'utilisant pas de surface au sol.

Un modèle numérique dynamique utilisant TRNSYS évaluera la faisabilité de ce stockage. Une analyse de sensibilité considère des paramètres clés tels que la géométrie de l'échangeur, la profondeur d'enfouissement, l'isolation, le matériau de stockage et son humidité. Ces paramètres permettront de dimensionner le système pour une optimisation technico-économique future.

Un banc expérimental à petite échelle est en développement à l'IRDL pour valider le modèle numérique. De futurs travaux étudieront l'effet thermosiphon pour réduire les coûts es coûts liés à l'utilisation d'une pompe de circulation.

SLiding Contact Investigation for Carbon Pantograph wear Evaluation (SLICE)

Oreen Oumer¹, Philippe Baucour¹, Pierre-Henri Cornuault¹, Eric Gavignet¹, Didier Chamagne¹

* ✉: oreen.oumer@femto-st.fr

¹ Université Marie et Louis Pasteur (UMLP), CNRS , Institut FEMTO-ST

Mots clés : Sliding Contact; Thermal Engineering; Electrical Engineering; Wear

Résumé :

Sliding electrical contacts play a vital role in railway systems by enabling current transfer between stationary and moving components, such as pantographs and overhead catenary lines. The contact strip of the pantograph is in direct contact with the copper catenary line.

The French National Railway Company (SNCF) uses various contact strip materials throughout its fleet, including graphite and metal-graphite composites. However, the wear mechanisms of these materials remain insufficiently characterized. This work aims to investigate the tribological behavior of such materials and to develop predictive wear laws suitable for railway applications.

Experiments are conducted on a dedicated test bench developed to reproduce pantograph-catenary contact by the Femto-st Energy department. The setup consists of a carbon pin pressed against a rotating copper disk under controlled load and speed. Friction, temperature, and vibration are continuously recorded, while material wear is quantified post-test by measuring the mass loss of the carbon pins.

Each material type has been tested under identical running conditions. Initial findings reveal wear rates correlate with material composition. Materials with higher metallic content exhibit greater wear. This behavior is attributed to the self-lubricating nature of graphite; materials with a higher graphite content demonstrate improved wear resistance and longer operational lifespans. This work will present a comparative analysis of wear rates as a function of metallic content across different materials.

Future work will focus on a deeper characterization of the materials' properties. It will also examine how operating parameters influence both wear rate and wear mechanisms. To achieve this, advanced surface analysis tools will be employed before and after testing. These techniques will help capture detailed material degradation mechanisms and support the development of either unified or material-specific wear models.

Optimisation énergétique des systèmes de climatisation centralisée à eau glacée dans les bâtiments tertiaires en milieu tropical humide

Olivier Marc¹, Jean-François Martin², Hélène Caillet², Loïc Singama³, Néjia Ferjani³, David Crugnale⁴, Christophe Lombardot⁵, Aurélien Brisse⁶

* ✉: olivier.marc@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion

² Laboratoire PIMENT

³ IMAGEEN

⁴ Q3E Conseils

⁵ INSET

⁶ IC66

Mots clés : Climatisation centralisée ; Efficacité énergétique ; Pilotage adaptable ; Confort thermique

Résumé :

Dans les territoires ultramarins comme La Réunion et la Guyane, la climatisation des bâtiments tertiaires représente entre 50 % et 80 % de leur consommation électrique annuelle. Ces installations fonctionnent quasi systématiquement avec une température de consigne fixe de 7 °C pour l'eau glacée, un standard hérité des pratiques historiques. Or, chaque degré d'élévation de cette température pourrait générer une économie d'énergie de 5 à 10 %, sans nécessairement compromettre le confort des occupants.

Ce projet de recherche vise à évaluer l'impact énergétique et climatique d'une stratégie de conduite évolutive de ces systèmes, en fonction des saisons et des usages réels des bâtiments. Deux sites pilotes universitaires sont instrumentés à La Réunion et en Guyane, offrant des conditions climatiques différentes (climats tropical humide vs équatorial). L'étude repose sur une approche sur trois niveaux : modélisation théorique du confort thermo-hygrométrique, expérimentation in situ avec des campagnes de mesure, et validation sur banc d'essai en environnement contrôlé.

Un outil numérique de simulation sera développé afin d'estimer les gains potentiels pour toute installation centralisée comparable. En complément, un guide technique destiné aux maîtres d'ouvrage, bureau d'études techniques et exploitants sera publié pour favoriser l'adoption de stratégies de pilotage optimisé. Ce projet s'inscrit dans une logique de réduction des consommations à grande échelle, en lien avec les objectifs du décret tertiaire et les politiques publiques de transition énergétique. Il vise aussi à structurer un réseau de compétences inter-outre-mer pour mutualiser les retours d'expérience.

Les résultats attendus sont à la fois techniques (réduction mesurée de 5 à 20 % des consommations par site), opérationnels (protocole de conduite adaptable) et méthodologiques (cadre reproductible sur d'autres territoires chauds et humides).

Thème 2

Hautes Températures - hauts flux

Conception, mise en œuvre et caractérisation d'un simulateur solaire à haute densité de flux d'une puissance de 45 kWel	64
Développement d'un dispositif expérimental pour la mesure de l'émissivité normale spectrale d'une céramique de CeO ₂ en conditions de thermochimie solaire	65
Simulation numérique du soudage par point : caractérisation et modélisation des résistances de contact	66
Modèle spectral EDQNM pour les écoulements turbulents fortement anisothermes en convection forcée	67

Conception, mise en œuvre et caractérisation d'un simulateur solaire à haute densité de flux d'une puissance de 45 kWel

Jesse Allens Touoyem Talla¹, Baptiste Henriot², Thierry Duvaut¹, Olivier Tantot², Nicolas Delhote², Michaël Charles³, Jaona Harifidy Randrianalisoa¹

* ✉: jesse-allens.touoyem-talla@univ-reims.fr

¹ ITheMM/Université de Reims Champagne-Ardenne, UR 7548

² Université de Limoges, Xlim, UMR 7252

³ CEA Le Ripault, Centre d'études du Ripault

Mots clés : Rayonnement solaire, matériaux céramiques, simulateur solaire à haute densité de flux, caractérisation thermique, énergie solaire concentrée, mesure de flux, hautes températures-hauts flux, thermographie infrarouge, jauge de flux

Résumé :

Ce travail présente la conception, la mise en œuvre et la caractérisation du premier simulateur solaire à haute densité de flux en France d'une puissance électrique de 45 kW. Ce dispositif consiste en un système à 7 lampes à arc au xénon de 6.5 kW chacune associée à un réflecteur ellipsoïdal. Le simulateur solaire a une configuration verticale avec des faisceaux se dirigeant de haut en bas et focalisés au même point, les deuxièmes points focaux des réflecteurs. Une table motorisée sert de support au porte échantillon. Dans ce travail, nous présentons d'une part, deux méthodes de caractérisation du flux lumineux et d'autre part, l'analyse du comportement thermique d'un matériau réfractaire, positionné au sein d'une cavité, irradié par simulateur solaire. Le dispositif de mesure de flux est composé d'une cible lambertienne refroidie à l'eau, d'une jauge Gardon et d'une caméra CCD. La méthode indirecte consiste à mesurer en nuance de gris le flux lumineux réfléchi par la cible ; mesurer avec la jauge la densité de flux à un ou plusieurs points de la cible ; établir une loi de calibration par minimisation des écarts entre les mesures de nuance de gris et celles de densité de flux aux différents points. La méthode directe mesure les valeurs de densité de flux sur un ensemble de points répartis uniformément sur le plan focal. La densité de flux maximal varie entre 1.73 et 2.40 MW/m² par lampe et est égale à 13.2 MW/m² lorsque les 7 lampes sont en fonctionnement. La densité de flux moyen sur une surface circulaire de 5 cm de diamètre est de 6.36 MW/m² correspondant à environ 6300 soleils pour une puissance rayonnante de 10 kW. Pour un échantillon d'Alumine positionné à 6 cm en dessous du plan focal et chauffé par les 7 lampes, d'intensité de courant variant entre 50% et 70%, la température maximale en face avant est de 1068°C. L'écart de température maximal à travers l'épaisseur et le long du rayon est respectivement 96°C et 170°C.

Développement d'un dispositif expérimental pour la mesure de l'émissivité normale spectrale d'une céramique de CeO₂ en conditions de thermochimie solaire

Léo Gaillard¹, Abderezak Aouali¹, Pierre-Marie Geffroy², Benoît Rousseau¹

* ✉: leo.gaillard@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes

² Institut de Recherche sur les CERamiques

Mots clés : oxyde de cérium ; émissivité ; haute température ; expérimental ; hydrogène solaire

Résumé :

L'optimisation de la production d'hydrogène (H₂) vert par thermochimie solaire passe par le design thermique d'architectures 3D poreuses à base d'oxyde de cérium (CeO₂). En effet, l'apport anisotrope d'un flux solaire concentré au niveau de la structure poreuse entraîne un important gradient de température selon le sens de propagation du rayonnement incident. Cela limite la production d'H₂ dans le volume réactionnel. Un des points clés pour conduire un design thermique précis homogénéisant l'absorption volumique du rayonnement par la structure est de connaître les émissivités spectrales directionnelles des constituants de base des architectures 3D de CeO₂ aux conditions de production d'H₂, i.e. 900 à 1500°C, pO₂ = 10⁻⁵ atm. Un banc de mesure de l'émissivité spectrale normale a été développé en ce sens. Il utilise un spectromètre FTIR Bruker 80v qui, via un miroir parabolique rotatif, collecte les flux émis par un four corps noir PYROX PY15 puis par une céramique de CeO₂ (d=25 mm) chauffée par les 2 faces par un laser diode (0.98 µm). L'échantillon de CeO₂ est placé dans une cellule étanche sous flux d'un mélange de gaz, permettant le contrôle de l'atmosphère environnante. La pO₂ est mesurée en sortie par une sonde zircone. Un pyromètre bi-chromatique mesurant la température de surface de l'échantillon permet la régulation de la puissance laser. Après avoir vérifié les performances du banc sur des matériaux étalon, les émissivités mesurées sont comparées aux spectres obtenus par une modélisation multi-échelles qui combine le modèle à 2 flux modifié et le modèle de Drude Lorentz. Elle s'appuie sur les mesures préalables des conductivités électriques de la céramique de CeO₂ de 900 à 1500°C, pO₂ de 10⁻¹⁸ à 1 atm, ainsi que ses propriétés optiques à condition ambiante. La confrontation des résultats permettra au final de mieux comprendre les liens existant entre propriétés de transport électrique et propriétés radiatives quand CeO₂ est utilisé en thermochimie solaire.

Simulation numérique du soudage par point : caractérisation et modélisation des résistances de contact

Edouard Geslain¹, Thomas Pierre¹, Cédric Pouvreau¹

* ✉: edouard.geslain@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud

Mots clés : soudage par résistance ; résistances de contact ;

Résumé :

Le soudage par résistance par point est le procédé le plus utilisé dans l'industrie automobile pour l'assemblage de la structure en acier des véhicules. C'est un procédé rapide et économique utilisant l'effet Joule pour faire fondre deux ou trois tôles pincées entre deux électrodes en cuivre. Si le procédé est bien connu, le développement des nouveaux aciers plus performants visant à alléger les véhicules conduit à de nouvelles configurations de soudage.

Les outils numériques pour ce procédé sont bien développés. Il reste cependant des interrogations sur la modélisation des résistances de contact, responsables de forts échauffements aux interfaces. D'un point de vue électrique, ce sont les constriction de courant au niveau des rugosités des surfaces en contact qui conduisent à un pic de production de chaleur par effet Joule. D'un point de vue thermique, c'est le flux de chaleur entre les tôles chaudes et les électrodes plus froides qui est perturbé par les aspérités.

Les résistances de contact électrique sont caractérisées par deux méthodes différentes puis utilisées dans un modèle numérique sur Comsol Multiphysics®. Il s'agit d'un modèle limité aux phénomènes électrothermiques.

Enfin, les résultats numériques sont comparés à des observations par caméra infrarouge dans les premiers instants, puis à des coupes macrographiques pour le développement de la soudure.

Modèle spectral EDQNM pour les écoulements turbulents fortement anisothermes en convection forcée

Léa Cherry¹, Gilles Flamant², Françoise Bataille¹

* ✉: lea.cherry@promes.cnrs.fr

¹ PROMES CNRS UPR8521/Université de Perpignan Via Domitia

² PROMES CNRS UPR8521

Mots clés : Convection forcée ; Turbulence ; Modèle spectral ; Energie solaire thermique ; Modélisation EDQNM

Résumé :

Cette étude est une analyse théorique des écoulements turbulents fortement anisothermes dans un régime de convection forcée, tels que ceux retrouvés dans les récepteurs solaires à air sous pression des tours solaires à concentration. L'objectif est de développer un modèle analytique qui met en évidence les mécanismes physiques de transferts d'énergie entre les échelles de la turbulence ainsi que le couplage entre la dynamique de l'écoulement et la thermique.

Les modèles de turbulence spectraux sont un excellent outil d'analyse théorique des écoulements turbulents, puisqu'ils permettent d'obtenir des spectres d'énergie qui caractérisent les échanges d'énergie au sein de l'écoulement. Ce type de modèles a été largement développé dans la littérature pour des écoulements incompressibles, anisotropes ou faiblement compressibles. Cependant, la température comme scalaire actif n'a été étudiée que dans le cadre de la convection libre, où la gravité joue un rôle clé. Au contraire, cette étude vise à explorer les mécanismes du couplage dynamique-thermique non liés à la gravité pour des écoulements anisothermes en convection forcée.

Afin de développer notre modèle spectral de turbulence, nous partons des équations à faible nombre de Mach, qui permettent de se concentrer sur les effets de compressibilité liés à la température. Nous formulons ensuite une série d'hypothèses sur les caractéristiques de l'écoulement permettant d'explicitier l'influence de la forte anisothermie.

Les spectres d'énergie sont obtenus à partir des équations d'évolution des corrélations doubles (vitesse, température et croisées). Ces équations mettent en jeu des corrélations triples inconnues. Nous utilisons l'approche EDQNM (Eddy-Damped Quasi-Normal Markovianized) afin de fermer ces équations et tirer les premières conclusions de notre modèle.

Thème 3

Micro et Nanothermique

Modèle théorique et analyse physique de la résistance thermique d'une interface liquide-vapeur . .	70
Caractérisation thermique de couches mince par thermoréfectance (TDTR) et radiométrie photothermique modulée	71
Numerical Simulation of Radiative Cooling Material Performanc Under Diverse Climatic Conditions .	72
Quantification de l'impact de la résistance thermique de contact ente fibres sur la conduction dans les matériaux d'isolation fibreux	73
Mesure de température dans des milieux semi-transparentes par imagerie photothermique hétérodyne en transmission	74
Transport de gaz en milieux poreux engendré par un gradient de température	75

Modèle théorique et analyse physique de la résistance thermique d'une interface liquide-vapeur

Gaetan Brunetto¹, Stéphane Blanco¹, Richard Fournier¹, Pascal Lavieille¹, Marc Miscevic¹

* ✉: brunetto@laplace.univ-tlse.fr

¹ LAPLACE

Mots clés : Modèles cinétiques; Passage Méso-Macro; Equations de Cahn-Hilliard; Systèmes diphasiques; Résistance thermique d'interface;

Résumé :

Dans le contexte de la miniaturisation des dispositifs de refroidissement diphasique, le rôle de la résistance au passage d'un flux thermique à l'interface liquide-vapeur devient de plus en plus prépondérant. Cependant, les modèles proposés actuellement pour prédire cette résistance font état d'une grande variabilité dans la valeur de certains paramètres pour un même fluide, pouvant aller jusqu'à plusieurs ordres de grandeur.

L'étude proposée vise à fournir une modélisation alternative des transferts de masse et d'énergie à l'interface. Pour ce faire, les équations de transport dans un fluide présentant une phénoménologie de Van der Waals sont établies à partir d'une approche mésoscopique. En partant d'une équation de Boltzmann modifiée, de type Enskog-Vlasov, et en utilisant la procédure de passage au macroscopique dite de Chapman et Enskog, les équations de transport macroscopiques sont déduites à partir du modèle mésoscopique. Ces équations prennent la forme d'équations de Cahn-Hilliard, avec pour solution d'équilibre un profil de densité continu à la traversée de l'interface.

Afin d'obtenir la résistance d'interface, le système d'équations est linéarisé par perturbation autour de cette solution d'équilibre, ce qui permet de donner le lien entre gradient de température et flux d'énergie. Cette résistance thermique est finalement comparée aux résultats de la littérature.

Caractérisation thermique de couches mince par thermoréflectance (TDTR) et radiométrie photothermique modulée

Christophe Rodiet¹, Nicolas Horny¹, Ghadir Ollaic¹

* ✉: christophe.rodiet@univ-reims.fr

¹ ITheMM

Mots clés : Conductivité thermique ; Time domain thermoRéflectance (TDTR) ; Radiométrie photothermique infrarouge ; Méthodes inverses ; Résistance ou Conductance thermique d'interface, Couches minces

Résumé :

Le contexte de cette étude est celui d'une demande d'un industriel fabriquant des composants microélectroniques (tels que des transistors de puissances), et désireux de mieux maîtriser, optimiser, et prédire les performances de leurs composants, pour lesquels une augmentation de 10°C des composants peut entraîner une baisse de la durée de vie de moitié.

Pour cela, il leur est nécessaire de connaître les propriétés thermiques des matériaux minces et composants multicouches qu'ils fabriquent, ce qui leur permettrait également d'établir un lien entre leurs procédés de fabrication, la microstructure, et les performances de leurs composants.

Ainsi, l'objectif de ce travail est la caractérisation thermique (conductivité ou diffusivité thermique et résistances d'interfaces) d'échantillons minces multicouches tels que ceux développés par l'industriel, et d'effectuer des mesures comparatives (benchmark) à l'aide des dispositifs de mesures par Thermo-Réflectance (NanoTR de la société NETZSCH) et par Radiométrie Photothermique Infrarouge Modulée (FD-PTR, développée au laboratoire), afin de s'assurer de la validité des résultats obtenus.

Les matériaux de l'industriel étant des matériaux complexes (multicouches, temps de conduction thermique très faible pour certaines couches, et nombreuses résistances d'interfaces non négligeables), des méthodes spécifiques sont développées et comparées.

Pour cela, dans un premier temps, des essais comparatifs des méthodes sont réalisés sur des échantillons test (échantillons simples et certifiés), afin de comparer et valider les méthodes.

Puis les méthodes sont testées et comparées sur des échantillons (bicouches) structurellement plus simples que le matériaux final (tricouche) afin de caractériser individuellement chacune des différentes couches constituant le composant final.

Enfin, les méthodes sont testées et comparées sur le matériau final, afin d'évaluer les limites, la robustesse et la précision des méthodes proposées.

Numerical Simulation of Radiative Cooling Material Performance Under Diverse Climatic Conditions

Hiba Mhiri¹, Anna Lushnikova¹, Christophe Ménézo¹

* ✉: christophe.menezo@univ-smb.fr

¹ LOCIE CNRS/USMB

Mots clés : Passive cooling technologies; numerical simulation; multi-scale modeling; Climate adaptability; BaSO₄ nanoparticles; Solar radiation

Résumé :

The growing need for sustainable and energy-efficient cooling solutions has driven the exploration of innovative materials for passive radiative cooling, particularly in mitigating urban heat island effects. This study presents a comprehensive multi-scale numerical simulation of BaSO₄/PVDF-HFP polymeric composites, designed to enhance radiative cooling performance across diverse climatic conditions. BaSO₄ is chosen for its exceptional solar reflectance and infrared emissivity, properties that reduce solar absorption and maximize thermal radiation emission.

A multi-scale approach is adopted to analyze the thermal and optical properties of these composites, integrating advanced modeling techniques and experimental validations across scales from nanoscale to mesoscale. Molecular dynamics simulations reveal that BaSO₄ dispersion improves key thermal properties, such as thermal conductivity and heat capacity, while COMSOL Multiphysics simulations show how nanoscale textures and surface structures enhance optical behaviors like reflectance and emissivity. The results highlight the potential of BaSO₄/PVDF-HFP composites to achieve sub-ambient cooling, with optimized surface structures improving solar reflectance and thermal emission. Simulations and experimental comparisons demonstrate significant cooling efficiencies under varying climatic conditions. Notably, tailoring surface roughness and BaSO₄ distribution within the matrix enhances cooling performance, making these materials adaptable to diverse climates.

These findings reveal the potential of tailored particle dispersion and surface structuring to achieve sub-ambient cooling performance, even in challenging climates.

This work contributes to the development of next-generation materials for solar energy systems, thermal barrier coatings, and passive cooling technologies. It establishes a predictive framework for designing scalable, high-performance coatings adaptable to diverse climates.

Quantification de l'impact de la résistance thermique de contact entre fibres sur la conduction dans les matériaux d'isolation fibreux

Clémence Gaunand¹, Yannick De Wilde², Valentina Krachmalnicoff², Adrien François³, Veneta Grigorova-Moutiers³, Karl Joulain⁴

* ✉: clemence.gaunand@espci.fr

¹ Saint-Gobain Research Paris / Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS / Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA

² Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS

³ Saint-Gobain Research Paris

⁴ Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA

Mots clés : Matériaux d'isolation fibreux ; Conduction ; Résistance thermique de contact ; Thermographie infrarouge ; Simulation numérique ; Conductivité solide

Résumé :

Comprendre les transferts de chaleur dans les matériaux isolants fibreux, en particulier conductifs, est un défi majeur en raison de leur nature hétérogène et multi-échelle, et de la contribution inconnue des contacts entre fibres. La conduction dans la laine de verre a été modélisée dans des travaux antérieurs ; cependant, l'existence d'une résistance thermique de contact entre les fibres n'a pas été prise en compte jusqu'à présent. Si sa valeur a été précédemment estimée, le liant organique présent au niveau des contacts dans les échantillons réels et son impact potentiel sur les transferts thermiques n'ont jamais été considérés.

Dans ce travail, nous proposons une méthode expérimentale novatrice, basée sur la thermographie infrarouge quantitative, pour mesurer la résistance de contact entre deux fibres de verre, en contact direct ou reliées par une goutte de liant. Nos résultats indiquent que la présence de liant ainsi que les paramètres morphologiques du contact peuvent influencer les transferts thermiques, mettant en évidence les impacts relatifs des résistances interfaciales et internes au contact.

Nous décrivons ensuite une nouvelle approche de simulation pour analyser la conduction à travers la phase solide dans des réseaux fibreux 3D générés numériquement, en considérant les contacts entre fibres. Par une étude paramétrique, nous montrons que leur impact sur les propriétés conductrices est fortement lié aux paramètres géométriques des fibres. Nous démontrons également que la conductivité solide peut être prédite par une courbe maîtresse, ce qui est confirmé par un modèle théorique également développé dans cette étude, en particulier dans le cas de milieux peu denses, représentatif des matériaux d'isolation. Enfin, en utilisant dans notre approche de simulation la gamme de résistances de contact mesurée expérimentalement, nous apportons une première évaluation de l'impact des contacts sur la conductivité effective dans les matériaux réels.

Mesure de température dans des milieux semi-transparents par imagerie photothermique hétérodyne en transmission

Jordan Letessier¹, Jérémie Maire¹, Stéphane Chevalier¹

* ✉: jordan.letessier@u-bordeaux.fr

¹ I2M - Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux

Mots clés : Thermographie; Spectroscopie; Coefficient de thermotransmittance; Imagerie photothermique hétérodyne; Transmission; Infrarouge; Modélisation; Microfluidique

Résumé :

Les mesures d'imagerie photothermique hétérodyne (PHI) sont couramment utilisées pour caractériser les propriétés thermiques (diffusivité, conductivité) ou pour analyser la composition chimique de matériaux par spectroscopie aux petites échelles (1 - 100 μm). Le plus souvent, ces études sont basées sur de la thermoréfectance, typiquement en combinant un laser pompe infrarouge et un laser sonde visible pour une meilleure résolution spatiale. Actuellement, ces techniques se limitent à l'étude des transferts en surface ou dans des matériaux fins (hypothèse isotherme dans l'épaisseur). Dans cette étude, nous présentons une méthode d'imagerie basée sur le signal de transmission de matériaux excités par une pompe infrarouge, offrant des avantages clés : elle est adaptée aux matériaux non réfléchissants et non transparents dans le visible (e.g. silicium), a une meilleure sensibilité pour les mesures dans des matériaux comme le PDMS et l'eau, et autorise la caractérisation de sources de chaleur sous la surface.

Nous avons mis au point un système de mesure par PHI en transmission (TPHI) comprenant un laser infrarouge focalisé pour le chauffage ($\lambda_{\text{as}} = 3,8 \mu\text{m}$) et une source infrarouge non cohérente large gamme (2-6 μm) modulée pour la détection. Le détecteur associé est une caméra infrarouge. En analysant les variations de transmission optique, nous avons déterminé et identifié les coefficients de thermotransmittance (κA) et de thermoréfectance (κR) pour trois matériaux: verre Borofloat, PDMS et eau. Ces mesures nous ont permis de cartographier les champs d'élévation de température avec une résolution de 26 $\mu\text{m}/\text{px}$ avec une précision de l'ordre du Kelvin dans des échantillons de différentes épaisseurs, y compris des films minces d'eau ($\leq 100 \mu\text{m}$) enfouis.

Cette approche a été validée par un modèle thermique 1D analytique et se révèle particulièrement efficace pour des applications en microfluidique où les méthodes conventionnelles par réflexion sont inapplicables.

Transport de gaz en milieux poreux engendré par un gradient de température

Junhao Tu¹, Emil Grigorov¹, Pierre Perrier¹, Irina Graur¹, Frédéric Topin¹

* ✉: junhao.TU@univ-amu.fr

¹ IUSTI

Mots clés : Thermal creep; Microfluidique; Milieux poreux; Expérimental

Résumé :

Expérimentalement nous utilisons un milieu poreux modèle constitué de 3600 capillaires ($D = 6$ microns, $L = 5$ cm) placés en parallèle et soumis à un écart de température contrôlé. Le banc expérimental est constitué d'un réservoir et un capteur de pression à chaque extrémité de l'échantillon ainsi qu'un capteur différentiel entre les réservoirs. La régulation de la température se fait par une résistance électrique de puissance contrôlée placée sur un de deux extrémités de l'échantillon, et un bain thermostaté froid de l'autre côté. Plusieurs thermocouples sont utilisés pour évaluer le profil de température dans le dispositif.

Les 2 réservoirs sont connectés par un by-pass pilotable. Le protocole expérimental comprend plusieurs phases. La première consiste à attendre le régime stationnaire quand le bypass est ouvert. Lorsque celui-ci est atteint, le bypass est fermé. Les pressions dans les 2 réservoirs sont identiques à cet instant. L'écoulement du gaz sous l'effet du gradient de température induit un transfert de masse du réservoir froid vers le réservoir chaud qui se traduit par l'apparition d'un différentiel de pression. Ce gradient de pression produit une force motrice opposée à celle du gradient de température ("thermal creep") qui réduit progressivement le transfert de masse net d'un réservoir vers l'autre. En régime établi, l'écart de pression atteint un maximum appelé "différence de pression thermomoléculaire". Le temps caractéristique d'établissement est le deuxième paramètre caractérisant ce comportement. Les deux paramètres dépendent de la nature du gaz et de la géométrie du poreux ainsi que du niveau de raréfaction.

Nous présentons l'analyse des premiers résultats expérimentaux obtenus en Argon ainsi que leur comparaison avec les approches analytiques connues pour les tubes et la modélisation numérique du système. Des pistes d'amélioration de la qualité de mesures sont proposés.

Thème 4

Modes de Transfert

Etude expérimentale des transferts de chaleur et de masse dans un système de dessalement solaire par humidification-déshumidification	79
Conception d'un spreader thermique à haute isolation électrique et immunité CEM	80
Influence du profil d'injection sur les transferts thermiques dus à l'impact d'un jet liquide à haut nombre de Prandtl	81
Etude expérimentale de l'influence du rayonnement sur la dynamique d'un écoulement turbulent de convection naturelle en cavité différentiellement chauffée	82
Caractérisation des performances thermo-hydrauliques de fluides caloporteurs en régimes de convection forcée et mixte dans un écoulement interne	83
Étude de la convection naturelle transitoire d'un fluide de Bingham à grande thermodépendance en viscosité	84
Etude expérimental de l'ébullition se produisant dans un film d'eau tombant sur une plaque verticale plane rainurée à des pressions proches du proche du point triple	85
Étude expérimentale du comportement des feux de nappe et du risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans une chambre à échelle réduite du château de Chambord	86
Influence de la circulation à grande échelle sur le transfert de chaleur en convection turbulente rugueuse	87
Un coefficient de chaleur peut-il être intrinsèque pour une configuration de convection forcée donnée ?	88
Transferts thermiques dans les matériaux granulaires à faible conductivité thermique : vers un échange de chaleur efficace pour les applications agro-alimentaires	89
Modélisation du couplage conducto-convecto-radiatif à l'échelle continue en vue de l'optimisation topologique d'absorbeurs solaires volumiques	90
Simulation par la méthode de Monte Carlo en espace de chemins du couplage conducto-radiatif : Application à la Gyroïde	91
Etude des mécanismes de conversion électrothermique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage	92
Étude expérimentale du refroidissement par impact de jet d'huile : influence de la courbure de surface	93
Analyse expérimentale de l'influence de la géométrie de la surface d'un solide sur son ablation par un jet de liquide	94
Étude numérique et expérimentale de l'évaporation de multi-gouttes sessiles : Influence de l'effet d'écran sur la dynamique d'évaporation	95
Étude d'un module de stockage thermique réversible pour réseaux urbains de chaud et de froid	96
Analyse de l'efficacité de mélange : Nanofluides vs. suspensions complexes	97

Étude de l'ébullition confinée de l'eau à basse pression pour les performances d'un échangeur de chaleur et de masse	98
--	----

Etude expérimentale des transferts de chaleur et de masse dans un système de dessalement solaire par humidification-déshumidification

Sirine Saidi¹, Lavinia Grosu¹, Khanh-Hung Tran¹, Arthur Dupuy¹, Rym Ben Radhia², Sadok Ben Jabrallah²

* ✉: sirine.s@parisnanterre.fr

¹ Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme (LEME), Université de Paris Nanterre.

² Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermiques et Massiques, Université de Tunis El Manar.

Mots clés : Dessalement, Transfert thermique, Transfert massique, Nombre de Nusselt, Nombre de Sherwood.

Résumé :

Ce travail présente une étude expérimentale des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans un système de dessalement solaire basé sur le principe d'humidification-déshumidification (HDH) évalué dans les conditions climatiques de Bizerte, en Tunisie. Le dispositif expérimental est composé d'un humidificateur intégré dans un capteur solaire (évaporateur solaire) et un déshumidificateur (condenseur tubulaire). Ce dispositif a été conçu et complété par un protocole de mesures spécifique pour la réalisation de cette étude. Les campagnes de mesure ont été effectuées en régimes de convection naturelle et forcée. À partir des résultats expérimentaux, les nombres de Nusselt et de Sherwood, qui quantifient respectivement les transferts de chaleur et de masse au sein du système de dessalement, ont été déterminés. Les résultats de cette étude montrent que ces transferts augmentent dans l'évaporateur solaire avec la vitesse d'aspiration d'air mais dans le condenseur ils augmentent jusqu'à la vitesse limite de $V=3.34 \text{ m s}^{-1}$ puis diminuent. Il est à noter aussi que le transfert thermique latent est beaucoup plus important que les transferts convectif et radiatif dans le cas de l'évaporation et la condensation. Au cours de cette étude, des corrélations ont été établies entre les nombres de Nusselt, sous leurs formes latente, convective, radiative et totale, et les nombres de Reynolds et de Prandtl. De plus, des corrélations liant les nombres de Sherwood aux nombres de Reynolds et de Schmidt ont été développées pour le fonctionnement de l'évaporateur solaire et du condenseur.

Conception d'un spreader thermique à haute isolation électrique et immunité CEM

Théophile Camus¹, Bénédicte Champel¹, Mathieu Mariotto¹, Léo Sterna¹

* ✉: theophile.camus@cea.fr

¹ CEA

Mots clés : Etalement thermique; Compatibilité électromagnétique; Electronique de puissance

Résumé :

La demande croissante en systèmes d'électronique de puissance à haute densité d'énergie (chargeurs embarqués, onduleurs de traction des véhicules électriques, onduleurs photovoltaïques...) impose simultanément d'augmenter les puissances en jeu et de réduire l'encombrement des systèmes. Il en résulte une plus grande difficulté à dissiper des puissances thermiques de plus en plus concentrées. En plus de cette problématique de gestion thermique de flux concentré, deux spécifications fortes restreignent le champ des solutions techniques applicables. D'une part, une haute isolation électrique est requise pour des raisons de sécurité. D'autre part, il est nécessaire de garantir une immunité aux perturbations CEM (Compatibilité Electro Magnétique), afin que les perturbations électromagnétiques générées du fait des hautes fréquences de commutation des transistors (particulièrement avec les composants grands gaps SiC ou GaN) ne soient pas propagées aux systèmes avoisinants. Un dispositif innovant répondant à cette triple problématique a été conçu et fabriqué. Ses performances thermiques, électriques et de CEM ont été comparées aux dispositifs conventionnels.

Influence du profil d'injection sur les transferts thermiques dus à l'impact d'un jet liquide à haut nombre de Prandtl

Benjamin Le Savoureux¹, Matthieu Fénot¹

* ✉: benjamin.le-savoureux@ensma.fr

¹ Institut Pprime - ISAE ENSMA

Mots clés : Impact de jet liquide; haut nombre de Prandtl; convection forcée

Résumé :

Le refroidissement par impact de jet liquide peut se révéler extrêmement performant et son utilisation est donc envisagée pour le refroidissement des parties critiques des moteurs électriques. Néanmoins, du fait des courants électriques, il est nécessaire d'avoir recours à des fluides diélectriques particulier tel que l'huile (hauts nombres de Prandtl...).

Afin d'analyser cette configuration, un dispositif expérimental a été mis en place. L'objectif principal de cette expérimentation est de caractériser les transferts de chaleur lors de l'impact d'un jet sur une paroi plane et analyser l'influence de différents paramètres. En particulier, l'influence de l'injection a été étudiée au travers de trois types d'injecteurs : une injection de type tubulaire, une de type convergent et une divergente. Plusieurs diamètres d'injection ont également été testés. La comparaison des transferts pour ces diamètres a montré que le nombre de Reynolds d'injection ne semblait pas être le plus adapté pour les similitudes. De plus, à diamètre équivalent, la forme de l'injection affecte les transferts dans la zone d'impact : l'injecteur divergent est le plus favorable aux transferts et le convergent le moins efficace. En effet, dans le cas d'une injection divergente, la vitesse tend à s'accélérer sur les bords du jet en sortie d'injecteur entraînant une uniformisation du profil de vitesse dans le jet et donc une augmentation des transferts.

Etude expérimentale de l'influence du rayonnement sur la dynamique d'un écoulement turbulent de convection naturelle en cavité différentiellement chauffée

Vincent Daurenjou¹, Florian Moreau¹, Didier Saury¹

* ✉: vincent.daurenjou@ensma.fr

¹ Institut Pprime

Mots clés : Convection naturelle ; Rayonnement ; Turbulence

Résumé :

Les écoulements de convection naturelle sont des écoulements générés par la présence d'un gradient de masse volumique au sein d'un fluide soumis à la pesanteur. Ce gradient peut lui-même être généré par un gradient de température dans le fluide. On observe fréquemment des écoulements de convection naturelle dans la vie courante. Ils sont également présents dans de nombreux domaines industriels où ils jouent un rôle important pour l'optimisation des transferts thermiques fluide-paroi. Afin d'étudier ces écoulements et les transferts thermiques associés, une cavité différentiellement chauffée est utilisée ici. Il s'agit d'une enceinte fermée parallélépipédique comprenant deux parois verticales et opposées imposant un gradient de température horizontal au fluide situé à l'intérieur de la cavité. C'est une configuration académique couramment utilisée.

L'objectif de ce travail consiste à caractériser expérimentalement les effets du rayonnement sur un écoulement de convection naturelle fortement turbulent. Cette étude s'inscrit dans la continuité du travail de Belleoud et al. (2018) qui ont étudié expérimentalement ces écoulements et les transferts thermiques associés en l'absence de rayonnement. La cavité différentiellement chauffée utilisée mesure 3,84 m de haut, 1 m de large et 0,86 m de profondeur. Afin d'observer les effets du rayonnement sur l'écoulement, une comparaison est faite en modifiant les émissivités des parois adiabatiques haute et basse de la cavité. Tout d'abord, un film aluminisé (mylar) d'émissivité $\epsilon = 0,10$ recouvre ces dernières. Puis, le revêtement est enlevé et de la peinture noire est appliquée pour obtenir une émissivité de $\epsilon = 0,92$. La dynamique de l'écoulement est caractérisée par Vélocimétrie par Image de Particules pour ces deux cas. L'analyse des résultats permet de mettre en évidence la contribution du rayonnement sur la dynamique de l'écoulement dans les différentes zones d'intérêt du système : couches limites, cœur de la cavité, ...

Caractérisation des performances thermo-hydrauliques de fluides caloporteurs en régimes de convection forcée et mixte dans un écoulement interne

Saba Chamoun¹, Catalin Popa¹, Stéphane Fohanno¹

* ✉: stephane.fohanno@univ-reims.fr

¹ Université de Reims Champagne-Ardenne

Mots clés : Convection thermique; Intensification; Coefficient d'échange; Banc d'essai; Expérimentation

Résumé :

Les changements climatiques et la diminution des énergies fossiles poussent à repenser notre approche de la production et de la consommation d'énergie. Dans ce contexte, les échangeurs thermiques jouent un rôle essentiel dans divers domaines industriels et technologiques. Aussi, le développement de techniques de transfert de chaleur efficaces est devenu important en raison de la demande croissante de refroidissement et de la miniaturisation des composants. Les fluides caloporteurs traditionnels ont des performances énergétiques limitées pour la dissipation de la chaleur dans des systèmes nécessitant une haute dissipation thermique. Une technique d'intensification consiste à modifier les propriétés du fluide caloporteur afin de lui conférer de meilleures propriétés d'échange thermique tout en étant facilement exploitables du point de vue de leur mise en écoulement. Le travail présenté dans cette communication vise à développer un banc d'essai de laboratoire aux conditions thermiques bien contrôlées pour la caractérisation expérimentale des performances thermohydrauliques des fluides caloporteurs en convection mixte ou forcée. Il comprend également une approche de métrologie thermo-fluidique avancée pour mesurer les propriétés thermiques, physiques et rhéologiques des fluides étudiés. L'évaluation des performances sur banc d'essai s'appuie sur une méthode de mesure du coefficient d'échange convectif par thermographie infrarouge développée au sein de l'équipe de recherche. Dans cet article, nous présenterons les résultats de mesures expérimentales réalisées sur notre banc d'essai dans une configuration d'écoulement interne dans un tube circulaire, en régimes de convection forcée et mixte. Les régimes laminaire, de transition et turbulent seront étudiés. Les résultats seront confrontés aux données de la littérature. L'influence de l'établissement thermique et de la nature du régime de convection (mixte ou forcée) sur la performance de l'échange thermique sera analysé.

Étude de la convection naturelle transitoire d'un fluide de Bingham à grande thermodépendance en viscosité

Ayoub Badia¹, Charles Brissot¹, Arnaud Poulesquen¹

* ✉: charles.brissot@cea.fr

¹ CEA

Mots clés : convection naturelle, viscosité thermodépendante, bitume

Résumé :

La compréhension du comportement thermique d'un déchet nucléaire d'enrobé bitumineux est importante d'un point de vue sûreté. Cette problématique nous mène à nous intéresser au comportement convectif transitoire en géométrie cylindrique de fluides complexes. Un déchet bitumineux est en effet constitué de bitume (haute thermodépendance en viscosité) enrobant des sels radioactifs (modification en viscosité et potentiel effet de seuil d'écoulement). Le scénario investigué consiste en un fut initialement à température ambiante soumis à une sollicitation thermique externe en créneau de température. Le fluide considéré est un fluide de Bingham dont la viscosité et le seuil d'écoulement évoluent exponentiellement avec la température. Cette étude se base sur les résultats précédemment établis en écoulement newtonien. Une première étude analytique permet d'estimer le seuil d'écoulement minimal garantissant l'absence de convection. Au-delà de ce seuil, l'écoulement est partiellement bloqué selon certaines zones soumises à de faibles cisaillements comme par exemple au centre. Cette analyse a été complétée par des simulations numériques réalisées en 2D axisymétrique via l'outil Comsol. Le modèle employé s'appuie sur l'approximation de Boussinesq. Comme pour le cas newtonien, les paramètres géométriques, les extrema de viscosité et le coefficient de dilatation thermique ont été modifiés afin de couvrir une large plage de nombre de Rayleigh (de 103 à 109). Cependant, différentes valeurs de seuil d'écoulement ont également été considérées afin de compléter les corrélations existantes en newtonien, notamment sur le temps caractéristique de réchauffement du système, sur le flux convectif maximal atteint et sur la vitesse maximale de la couche limite convective.

Etude expérimental de l'ébullition se produisant dans un film d'eau tombant sur une plaque verticale plane rainurée à des pressions proches du proche du point triple

Florine Giraud¹, Benoit Stutz¹

* ✉: florine.giraud@univ-smb.fr

¹ LOCIE

Mots clés : film-tombant, ébullition, point triple, évaporateur, eau, R-718

Résumé :

Les évaporateurs à films tombants sont généralement utilisés dans les systèmes thermiques de rafraîchissement utilisant l'eau comme fluide frigorigène (comme les systèmes ab et adsorption) car ils présentent des performances nettement supérieures à ceux des échangeurs à ébullition pour des conditions de fonctionnement à basse pression. Les performances de ces échangeurs dépendent fortement des épaisseurs de films tombants compte tenu de la faible conductivité thermique de l'eau. Un évaporateur à plaques rainurées a été développé et étudié au laboratoire LOCIE permettant d'assurer un bon mouillage des parois tout en garantissant de faibles épaisseurs de films.

Les performances thermiques de cet échangeur ont été expérimentalement étudiées à des pressions absolues variant de 13 mbar à 23 mbar, des surchauffes pariétales comprises entre 1 et 15 K et des nombres de Reynolds allant de 80 à 460. Les régimes d'ébullition qui s'y développent (surchauffe de déclenchement de l'ébullition, taille, vitesse de croissance et vitesse de transport de ces bulles, coefficient d'échange) sont étudiés. Il est montré que le développement de l'ébullition, sensiblement différent de celui observée à pression atmosphérique, apparaît avoir un impact négligeable sur la performance de l'échangeur.

Étude expérimentale du comportement des feux de nappe et du risque d'inflammation des gaz imbrûlés dans une chambre à échelle réduite du château de Chambord

Ziyuan Chen¹, Brady Manescau¹, Khaled Chetehouna¹, Ilyas Sellami¹, Ludovic Lamoot¹

* ✉: ziyuan.chen@insa-cvl.fr

¹ INSA Centre Val de Loire

Mots clés : Feu de nappe; Comportement du feu; Sécurité incendie; Confinement; Bâtiments historiques; combustion oscillatoire basse fréquence

Résumé :

La présente étude porte sur l'analyse du comportement d'un incendie en milieu confiné, en explorant divers régimes de ventilation (feu sous-ventilé et très sous-ventilé). Les essais expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'un modèle réduit reproduisant une pièce emblématique du Château de Chambord. Une attention particulière a été accordée à la nature et à la quantité des combustibles ainsi qu'aux oscillations de flamme à basse fréquence.

Le modèle, à l'échelle 1/8 de la chambre royale, est conçu avec des parois en béton cellulaire et des écrans en bois. Une cheminée et une porte reproduisent les conditions de ventilation. L'instrumentation inclut un peson pour la perte de masse (MLR) et le taux de libération de chaleur (HRR), des thermocouples pour tracer les profils de température, des fluxmètres pour évaluer les flux thermiques radiatifs et totaux, des capteurs de pression pour suivre les variations internes, et des analyseurs de gaz pour les émissions.

Des essais ont été réalisés avec divers diamètres de nappe et taux de renouvellement d'air pour examiner le feu en milieu confiné. Les résultats montrent que le comportement du feu varie selon le régime de combustion. L'évaluation du risque, basée sur une approche globale, indique que le plus grand feu de nappe présente un risque d'inflammation élevé, tandis que le plus petit reste sous le seuil d'inflammation. Cette étude apporte des perspectives pour la sécurité incendie des bâtiments historiques.

Influence de la circulation à grande échelle sur le transfert de chaleur en convection turbulente rugueuse

Nathan Carbonneau¹, Julien Salort², Yann Fraigneau³, Anne Sergent⁴

* ✉: nathan.carbonneau@lisn.fr

¹ Sorbonne Université, Collège Doctoral, Paris, France; Lab. Interdisciplinaire des Sciences du Num. , Université Paris-Saclay, CNRS, Orsay, France

² Lab. Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon, CNRS, Lyon, France

³ CNRS, Lab. Interdisciplinaire des Sciences du Numérique, Université Paris-Saclay, CNRS, Orsay, France

⁴ Sorbonne Université, Fac. des Sciences et Ing. , Paris, France; Lab. Interdisciplinaire des Sciences du Num. , Univ. Paris-Saclay, CNRS, Orsay, France

Mots clés : convection naturelle; turbulence; DNS; état de surface

Résumé :

Des simulations numériques directes 3D sont réalisées en configuration de Rayleigh-Bénard confinée et périodique pour un nombre de Rayleigh de 1010 . La plaque inférieure est soit lisse, soit rugueuse. Les domaines périodiques visent à reproduire les petites structures du cœur de la cavité, mais sans le cisaillement dû au vent de la circulation à grande échelle. Par comparaison des cas confinés et périodiques, l'effet du vent est mis en évidence. On montre que dans le cas lisse, le transfert de chaleur est indépendant de la présence du vent. Contrairement à ce qui est communément admis, l'augmentation du transfert de chaleur par la rugosité ne repose qu'en partie sur les interactions vent - rugosité, et uniquement lorsque la rugosité émerge au-dessus des couches limites thermique et visqueuse.

Un coefficient de chaleur peut-il être intrinsèque pour une configuration de convection forcée donnée ?

Denis Denis¹, Benjamin Rémy¹

* ✉: denis.maillet@univ-lorraine.fr

¹ LEMTA - Université de Lorraine

Mots clés : Coefficient d'échange; Convection forcée; Régime transitoire; Impédance thermique

Résumé :

Le coefficient de transfert de chaleur, et les corrélations entre nombres adimensionnels qui en découlent (Nusselt fonction de Reynolds et de Prandtl), sont utilisés couramment pour représenter une condition d'interface entre un milieu solide et un écoulement en convection forcée. On montre ici que cette approche commode, qui est basée sur un régime permanent idéal, nécessite un certain nombre de conditions pour être rigoureusement justifiée.

L'approche présentée est basée sur le cas d'un régime thermique transitoire (champ de température initial permanent dans chacun des milieux), régi par une équation de la chaleur (conduction et advection) et à des conditions aux limites Linéaires et à coefficients Invariants en Temps (Système LIT), le transfert étant causé par la variation d'une source thermique unique à support séparable temps/espace (température du fluide ou puissance thermique) quelque part dans l'ensemble du système.

Ceci permet de faire apparaître des fonctions de Green temporelles (impédances, transmittances ou admittances) liant réponse, en température ou en densité de flux, en tout point du domaine à la variation de cette source par l'intermédiaire d'un produit de convolution. Lorsque cette relation convolutive est appliquée en un point de la paroi, on montre en particulier i) qu'en transitoire, un coefficient d'échange variant temporellement n'a aucun sens et ii) que, lorsque plusieurs sources thermiques varient pour atteindre, avec leur réponse pariétale locale en température et en densité de flux, un niveau permanent asymptotique, la notion de coefficient d'échange n'a plus de valeur intrinsèque.

Transferts thermiques dans les matériaux granulaires à faible conductivité thermique : vers un échange de chaleur efficace pour les applications agro-alimentaires

Francois Rioual¹

* ✉: francois.rioual@inrae.fr

¹ INRAE

Mots clés : transferts thermiques, milieux hétérogènes, matériaux granulaires, échangeur à chaleur, MBHE

Résumé :

Arriver à réfrigérer efficacement la matière en grains représente un défi important en terme d'efficacité énergétique dans de nombreux secteurs de l'industrie agroalimentaire (ex: sucre, cacao, café...) et de la bioénergie (pellet de bois, boue granulée). Les procédés d'échange de type indirects assurent le transfert thermique par conduction indirecte entre un milieu granulaire en écoulement et une surface d'échange (tube, plaque) au sein duquel circule un fluide thermostaté et représentent une alternative intéressante aux voies directes (typiquement lits fluidisés) en raison de leur potentielle sobriété énergétique. Un nouvel échangeur à chaleur à lit mobile (MBHE) "Tube and drum" a été proposé récemment qui permet de maximiser le temps de transfert entre le matériau granulaire et le tube.

La caractérisation thermique et la maîtrise de ce type de système n'est pas simple et nécessite notamment l'analyse des modes de transfert de l'énergie thermique dans des systèmes de particules biosourcées en mouvement qui peut nous permettre de proposer des voies technologiques plus efficaces en terme d'échange thermique.

Les particules de matériaux biosourcés présentent la particularité d'être à relativement faible conductivité thermique (particule/air) et dans ces conditions, le transfert d'énergie de grain à grain ou de grain à paroi ne se fait pas uniquement par contact physique intergranulaire mais fait intervenir l'air interstitiel dans l'espace entre particules d'une manière encore peu analysée.

Nous présenterons les principes du nouvel échangeur (MBHE) et les expériences qui sont menées pour analyser l'échange thermique à travers deux situations modèles: le transfert lors du contact d'une particule avec une plaque chauffante; (2) le transfert de l'impact d'une particule avec une plaque chauffante.

Modélisation du couplage conducto-convecto-radiatif à l'échelle continue en vue de l'optimisation topologique d'absorbeurs solaires volumiques

Augustin De La Vauvre¹, Benoit Rousseau², Yann Favennec², Laurent Cangemi¹

* ✉: augustin.delavauvre@gmail.com

¹ IFPEN

² LTEN

Mots clés : Absorbeur solaire, Optimisation topologique, milieux poreux

Résumé :

La réduction des émissions des gaz à effet de serre est aujourd'hui un enjeu environnemental majeur. Cela est particulièrement vrai pour les industries usant de hautes températures ($T > 1000^\circ\text{C}$) pour lesquelles la génération de la chaleur est assurée principalement par la combustion de gaz. L'usage du rayonnement solaire concentré au sein d'absorbeurs solaires volumiques ouverts est une voie pour produire de la chaleur décarbonnée à de telles températures. L'enjeu est alors de s'assurer de leur longévité pour de hauts taux de conversion ($> 85\%$). Cela passe par un design optimisé de leur architecture tridimensionnelle qui doit permettre de maximiser les échanges convecto-conducto-radiatifs, pour des conditions fixées d'insolation et de rentrée d'air. Pour ce faire, un code d'optimisation topologique 2D axisymétrique, tenant compte du transport convecto-conducto-radiatif à l'échelle continue a été développé. La propagation du flux solaire concentré (1 MW/m^2) est régie par une équation de transport-extinction et l'écoulement de l'air par l'équation de Darcy-Forchheimer. Les pertes radiatives sont simulées par la méthode P1, basé sur un développement en harmoniques sphériques à l'ordre 1 de la luminance, simplifiant l'équation du transfert radiatif en une équation de diffusion. Les valeurs des différentes grandeurs physiques effectives (coefficient d'extinction, coefficient d'échange thermique, etc.) alimentant les équations couplées sont données en fonction de la porosité et/ou du diamètre nominal des pores. L'optimisation topologique se fait par un calcul des états adjoints et par descente de gradient. Différentes fonctions de coût ont été utilisées comme la maximisation de rendement de conversion solaire-chaleur et la minimisation des gradients thermiques spatiaux. Les premiers résultats donnent pour un faisceau incident gaussien des absorbeurs à gradient de porosité selon l'axe de propagation du rayonnement solaire.

Simulation par la méthode de Monte Carlo en espace de chemins du couplage conducto-radiatif : Application à la Gyroïde

Adjovi Alexandra Fortunat¹, Mouna El Hafi¹, Kokou N'Wuitcha², Frédéric Topin³, Léa Penazzi³, Simon Eibner¹, Richard Fournier⁴, Stéphane Blanco⁴

* ✉: adjovi.fortunat@mines-albi.fr

¹ RAPSODEE, UMR CNRS 5302, IMT Mines Albi, Campus Jarlard, 81013 Albi, France

² LES-GPTE, Université de Lomé, 01BP1515 Lomé, Togo

³ Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France

⁴ LAPLACE, UMR CNRS 5213, Université Paul Sabatier, Toulouse, France

Mots clés : Méthode de Monte-Carlo ; Conduction thermique ; Rayonnement ; Stardis ; Conductivité thermique effective ; Milieu poreux

Résumé :

La croissance démographique mondiale entraîne une forte hausse de la demande énergétique, toujours dominée par les énergies fossiles malgré leurs effets négatifs sur l'environnement. Cela encourage l'adoption d'énergies renouvelables, comme la biomasse, une source accessible, économique et écologique, essentielle pour la cuisson dans de nombreuses régions. En effet, plus de 2,7 milliards de personnes dépendent de la biomasse solide pour cuisiner, utilisant généralement des foyers peu performants. Face à la raréfaction de cette ressource due à la demande croissante, il est crucial de réduire sa consommation. Une solution consiste à optimiser le rendement thermique des fours en comprenant le comportement thermique de leurs matériaux. Dans ce contexte, notre étude se concentre sur le géopolymère poreux à base d'argile de Bangeli, matériau dont les propriétés thermiques et mécaniques ont montré un fort potentiel pour la construction de fours de cuisson. Pour comprendre le comportement thermique de ce matériau, nous avons réalisé une étude numérique basée sur la résolution de l'équation de la chaleur en présence ou non de rayonnement, en utilisant la méthode de Monte Carlo, cette dernière étant notamment insensible à la complexité géométrique. Cette étude porte sur la détermination des propriétés thermiques effectives d'une gyroïde, un milieu poreux périodique généré numériquement, représentant un bon point de départ pour l'étude d'un milieu complexe aperiodique tel que l'argile de Bangeli.. La résolution du modèle thermique se fait en deux étapes : d'abord, la température de la surface à flux imposé est calculée en résolvant l'équation de la chaleur par la méthode de Monte Carlo, via le logiciel libre Stardis. Ensuite, la conductivité thermique effective est déterminée selon la loi de Fourier. Cette approche a permis d'évaluer la conductivité thermique. Enfin, l'étude de l'influence de la déformation structurale sur les propriétés thermiques a également été étudiée.

Etude des mécanismes de conversion électrothermique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage

Kaoutar Taleb¹, Guillaume Castanet¹, Alexandre Labergue¹

* ✉: alexandre.labergue@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine

Mots clés : Givrage; actionneur plasma; fluorescence induite par laser

Résumé :

Ce travail présente les premières mesures de l'évolution de la température d'un dépôt de glace soumis à un flux de chaleur généré par un actionneur plasma. L'étude rentre dans le cadre du développement d'un nouveau dispositif du contrôle du givrage basé sur un actionneur plasma de type décharge à barrière diélectrique. Le principe consiste à générer un plasma à la surface d'un diélectrique en appliquant une haute tension alternative entre 2 électrodes disposées de part et d'autre du diélectrique. Si des mesures de températures de la surface du diélectrique ont déjà été reportées, en revanche les mécanismes de transferts de chaleur et de masse entre le plasma, la glace et le diélectrique restent largement méconnus. Cette étude vise alors à apporter une contribution en mesurant l'échauffement de la glace dans le cas d'un mode de fonctionnement dégivrage de l'actionneur. C'est à dire qu'on considère le cas où un dépôt de glace préalablement déposé avant la mise en route de l'actionneur. Ici, le dépôt de glace consiste en une goutte qui s'est solidifiée après impact sur le diélectrique au voisinage de l'actionneur. L'échauffement sera mesuré par thermométrie d'imagerie de fluorescence induite par laser (PLIF). L'influence de la nature du diélectrique ainsi que de la puissance électrique apportée est analysée. Les premiers résultats montrent bien un échauffement plus important de la glace quand la puissance électrique augmente. Enfin, cet échauffement est également plus important quand le diélectrique est thermiquement plus résistif, signifiant que la chaleur induite par le plasma est préférentiellement transférée vers la glace.

Étude expérimentale du refroidissement par impact de jet d'huile : influence de la courbure de surface

Antoine Martiré¹, Matthieu Fénot¹, Manuel Girault¹

* ✉: antoine.martire@ensma.fr

¹ Institut P Prime- ISAE ENSMA

Mots clés : Impact de jet liquide ; Haut nombre de Prandtl ; Convection forcée

Résumé :

Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les véhicules entièrement électriques représentent une voie prometteuse. Cependant, leurs performances sont limitées par la température maximale atteinte par le moteur électrique. Une solution envisagée pour surmonter cette limitation consiste à refroidir directement les zones critiques du moteur à l'aide de jets d'huile diélectrique.

Très peu d'études expérimentales se sont penchées sur l'analyse de ces transferts de chaleur, notamment dans des configurations géométriques complexes représentatives d'un moteur électrique. Nos travaux visent à caractériser expérimentalement les échanges thermiques entre un jet d'huile et sa surface d'impact dans diverses configurations géométriques. Nous étudierons en particulier l'influence de la courbure, ainsi que celle de paramètres dynamiques comme les nombres de Reynolds et de Prandtl.

Pour ce faire, un banc d'essais a été conçu, intégrant une technique de mesure par thermographie infrarouge sur la face opposée à celle impactée par le jet. Cette mesure, couplée à une méthode inverse tridimensionnelle, permet d'estimer la répartition surfacique du coefficient d'échange thermique sur la surface refroidie par le jet d'huile.

Les résultats montrent que l'influence de la courbure dépend fortement de sa nature convexe ou concave. Sur une surface convexe, les effets thermiques de la courbure restent très limités, car la convexité maintient la stabilité des jets laminaires ou faiblement turbulents, ce qui rend les transferts similaires à ceux sur une paroi plane. En revanche, dans le cas concave, une nette diminution des transferts de chaleur apparaît dans la zone de stagnation. Ces détériorations semblent résulter de recirculations et perturbations locales de l'écoulement. De plus, une légère baisse des échanges de chaleur se manifeste au-delà du point d'impact, probablement à cause des effets gravitaires perturbant l'écoulement, et accentués par la concavité de la surface.

Analyse expérimentale de l'influence de la géométrie de la surface d'un solide sur son ablation par un jet de liquide

Asma Djermoune¹, Alexandre Lecoanet¹, Nathalie Seiler¹, Nicolas Rimbert², Michel Gradeck²

* ✉: asma.djermoune@univ-lorraine.fr

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

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

Mots clés : sûreté nucléaire; récupérateur; corium; ablation thermique; inclinaison; rugosité

Résumé :

Dans le contexte des réacteurs rapides refroidis au sodium (RNR-Na), la prévention des accidents nucléaires graves représente un enjeu majeur de sûreté. Lors d'un accident avec fusion du cœur, un mélange radioactif appelé corium, composé de combustible nucléaire fondu et de matériaux structurels, peut se former. Ce corium, transporté sous forme d'un jet extrêmement chaud (environ 3000 K), est dirigé vers un dispositif clé : le récupérateur de corium. Ce dernier, placé au fond de la cuve principale, est conçu pour limiter les risques de recriticité et assurer le refroidissement à long terme du corium. Cependant, l'impact du corium sur le récupérateur peut entraîner une ablation locale de sa surface, compromettant sa résistance et son intégrité structurelle. Ce phénomène d'ablation représente un défi dans la conception des nouveaux RNR-Na. Dans ce contexte, cette étude se focalise sur l'analyse des mécanismes d'ablation thermique et les effets des paramètres géométriques, notamment l'inclinaison et la rugosité des surfaces. Des expériences ont été réalisées avec des matériaux stimulants (bloc de glace transparent et un jet d'eau), en reproduisant des conditions proches de celles d'un réacteur nucléaire. Les résultats montrent que la rugosité et l'inclinaison influencent de manière significative les transferts thermiques, augmentant le taux d'ablation. Ces conclusions fournissent des données importantes pour améliorer la conception des récupérateurs, renforçant leur durabilité et leur efficacité face à des situations extrêmes.

Étude numérique et expérimentale de l'évaporation de multi-gouttes sessiles : Influence de l'effet d'écran sur la dynamique d'évaporation

Oumayma Somrani¹

* ✉: oumaymasomrani@gmail.com

¹ Faculté des Sciences de Bizerte

Mots clés : évaporation, multi-gouttes, sessile, 3D

Résumé :

L'évaporation des gouttes sessiles constitue un phénomène clé dans de nombreuses applications industrielles. Dans ces applications, une goutte est rarement seule, mais souvent entourée par d'autres. Ce processus implique des transferts simultanés de chaleur et de masse, ainsi que des interactions complexes entre les gouttes selon leurs configurations. Notre étude, à la fois numérique et expérimentale, vise à analyser le processus d'évaporation de multi-gouttes sessiles placées sur un substrat rigide dans des conditions ambiantes.

Un modèle tridimensionnel a été développé et résolu à l'aide de COMSOL Multiphysics. Les simulations de deux gouttes identiques proches montrent des disparités de température à leurs extrémités et une non-uniformité des flux évaporés sur la surface de chaque goutte, attribuées à l'effet écran mutuel. Cet effet diminue avec l'augmentation de la distance entre les gouttes, réduisant les variations des taux d'évaporation. En revanche, une goutte isolée présente des profils symétriques et uniformes, en l'absence de perturbations externes.

Une expérience est en cours de réalisation pour valider ces observations numériques. Trois techniques de mesure (thermique, massique et optique) sont mises en œuvre. Après calibration, des investigations permettront d'explorer les interactions entre gouttes en fonction de leur disposition et de la distance les séparant. Les résultats expérimentaux seront comparés aux simulations numériques pour affiner la compréhension des influences mutuelles sur les taux d'évaporation.

Étude d'un module de stockage thermique réversible pour réseaux urbains de chaud et de froid

Thomas Terrien¹, Awa Sy¹, Arnaud Bruch¹, Fabrice Bentivoglio¹, Benoit Stutz²

* ✉: thomas.terrien@cea.fr

¹ CEA Grenoble

² LOCIE

Mots clés : Stockage thermique ; Energie latente ; Energie Sensible ; MCP ; Thermocline ; Convection Naturelle ; Conduction thermique

Résumé :

Ce travail présente une solution innovante de stockage thermique réversible, adaptée aux besoins des réseaux urbains. Grâce au couplage synergique entre stockage sensible (thermocline) et stockage latent (prise en glace), le système combine polyvalence saisonnière, compacité et simplicité d'intégration aux réseaux urbains. Les premiers essais mettent en lumière l'influence des phénomènes conducto-convectifs complexes, qui orientent désormais les développements numériques et expérimentaux futurs.

Le dispositif expérimental VERSATILE se compose d'une calandre de 430 litres d'eau, et de deux circuits hydrauliques, intégrés dans la boucle thermique POLYTES, permettant simultanément l'apport de puissance chaude et froide. Il est instrumenté par 228 thermocouples pour connaître en temps réel la distribution de température à l'intérieur du réservoir et des circuits qui le traversent. En mode hiver, on stocke de la chaleur sensible sous forme d'eau chaude afin d'alimenter un réseau de chauffage hydraulique. En mode été, on stocke du froid latent sous forme de glace d'eau pour le redistribuer dans un réseau de climatisation. Le premier circuit permet la mise en place d'une thermocline verticale par injection d'eau chaude jusqu'à 90 °C, assurant la stratification thermique durant le mode hiver. Le second, alimenté par un groupe froid, fait circuler de l'eau glycolée à température négative (jusqu'à -20 °C), permettant la formation de glace autour des ailettes d'un échangeur spiralé en cuivre. Ce dernier favorise la solidification de l'eau utilisée comme MCP, exploitant ainsi son énergie latente de fusion au cours de la transition liquide-solide à 0°C.

Une particularité de ce module est l'interaction étroite entre les deux technologies de stockage thermique : la thermocline se forme également lors de la décharge du système en mode été, et la fusion de la glace par contact direct avec le fluide caloporteur constitue un phénomène encore peu documenté expérimentalement.

Analyse de l'efficacité de mélange : Nanofluides vs. suspensions complexes

Charles Carré¹, Tom Lacassagne¹, S. Amir Bahrani¹

* ✉: charles.carre2802@gmail.com

¹ IMT Nord Europe, Institut Mines Télécom, Univ. Lille, Centre énergie & environnement, F-59000 Lille

Mots clés : Ecoulement de Taylor-Couette, Suspensions complexes, Fluorescence plane induite par laser (PLIF)

Résumé :

L'étude du transfert convectif dans les composants thermo-fluidiques vise à optimiser leurs performances, un enjeu crucial pour la transition énergétique, notamment via l'efficacité énergétique. Le développement d'un fluide caloporteur intensifiant les transferts thermiques reste un défi scientifique et technologique pour améliorer le refroidissement dans les procédés industriels. Cette étude analyse l'impact des particules en suspension dans des fluides newtoniens et non-newtoniens sur l'intensification du mélange. Elle explore comment ces particules déclenchent des instabilités hydrodynamiques renforçant les mécanismes de transfert convectif.

Plusieurs solutions sont étudiées : un nanofluide en suspension newtonienne, une suspension newtonienne avec micro-particules, une solution viscoélastique pure, et une suspension viscoélastique. L'étude utilise une configuration d'écoulement de Taylor-Couette, avec un cylindre intérieur en rotation sur un rhéomètre permettant la mesure du couple. Un système métrologique avancé, basé sur la fluorescence plane induite par laser (PLIF), analyse le mélange à différents nombres de Reynolds. Un indice de mélange est alors déterminé, où $M=1$ signifie un mélange parfait et $M=0$ une solution hétérogène. Les régimes d'écoulement étudiés présentent des structures instationnaires favorisant le transport. Pour les solutions newtoniennes, le régime de vortex de Taylor (TVF) est utilisé, tandis que pour les solutions viscoélastiques, c'est le régime de turbulence élasto-inertielle (EIT) qui génère des instabilités même à bas nombres de Reynolds, améliorant le mélange.

L'analyse montre que l'ajout de particules (nano ou micro) dans un solvant améliore l'efficacité du mélange en régime turbulent (TVF ou EIT). Autrement dit, l'homogénéité est atteinte plus rapidement en ajoutant une faible concentration de particules.

Étude de l'ébullition confinée de l'eau à basse pression pour les performances d'un échangeur de chaleur et de masse

Antoine Dumain¹, Florine Giraud¹, Guillaume Castanet², Benoit Stutz¹

* ✉: antoine.dumain@univ-smb.fr

¹ LOCIE Laboratory, Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR5271, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget Du Lac, France

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

Mots clés : ébullition à basse pression ; ébullition confinée ; films tombants ; machines à absorption H₂O/LiBr

Résumé :

Afin d'améliorer les performances des échangeurs de masse et de chaleur utilisés dans les machines à absorption H₂O/LiBr, l'ébullition confinée de l'eau à basse pression est étudiée. Le dispositif expérimental est constitué d'un échangeur à plaque de 140 x 140 x 0.55 mm, créant un confinement 5 fois plus petit que la longueur capillaire. L'eau liquide à saturation circule dans la partie basse de l'échangeur, et la vapeur générée est évacuée par la partie supérieure. La pression de travail est imposée par un condenseur, fixée dans cette étude à 10, 20 ou 30mbar. Une surchauffe variant de 2.5K à 20K est imposée au liquide via un fluide secondaire circulant à l'arrière de l'échangeur. Des bilans d'énergie sont réalisés pour quantifier la puissance thermique échangée avec le fluide secondaire et tracer des courbes d'ébullition pour ces trois pressions. Du fait de l'important volume spécifique de la vapeur à ces pressions, de larges bulles apparaissent (plusieurs cm), écrasées de surcroît par le confinement. Au cours de leur croissance, les bulles interagissent avec la surface libre créant une double interface vapeur (dans la bulle) – liquide – vapeur (environnement). L'explosion de la bulle et la rupture de cette double interface provoquent ainsi le dépôt d'un très fin film de liquide dont l'évaporation permet l'obtention d'importants coefficients d'échange thermique. L'étude d'images obtenues par caméra rapide permet de plus la mise en relation du régime d'ébullition (temps d'attente, surface de projection du film...) et des performances de l'échangeur. Ces résultats serviront de référence lors de l'étude de la désorption dans ce même échangeur d'une solution aqueuse de bromure de lithium pour les machines à absorption. Ils constituent également de nouvelles données expérimentales sur l'ébullition confinée à basse pression, permettant une compréhension plus fondamentale de ce phénomène.

Thème 5

Modélisation et Simulation Numérique

Contribution of multiphysics CFD simulation to the reduction of pollutant emissions from domestic heating appliances: application to a pellet stove	100
Thermal Analysis of Multilayered Building Walls Using the Thermal Quadrupole Method: Transfer Functions, Convolution-Based Predictions, and Multispot Excitation Scenarios	101
Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine à gaz classique : Analyse des performances de combustion et impact de la vapeur d'eau sur les émissions polluantes	102
Optimisation des Aéroréfrigérants dans les Usines de GNL : Amélioration des Performances par Aspersions Directes d'Eau	103
Étude numérique de l'intensification des échanges dans un absorbeur de capteur solaire	104
Simulation numérique 3D et optimisation de l'intensification des échanges thermofluidiques d'un microcanal d'échangeur thermique par micro-structuration des surfaces d'échange	105
Fine characterisation of the solar resource variability in intricate urban environments by means of higher-order modal decomposition	106
Modélisation nodale d'un transformateur de traction électriques ferroviaire	107
Modélisation FEM multi-échelle du transfert thermique lors du processus AFP in-situ sur des composites thermoplastiques	108
Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans une centrale photovoltaïque flottante : utilisation de la méthode des frontières immergées	109
Etude de la convection naturelle turbulente dans un bain liquide élargi et chauffé en volume	110
Thermique par Monte-Carlo : modèles pour l'anisotropie et le rayonnement dans un milieu chauffant	111
Modélisation dynamique et optimisation d'un stockage thermique par adsorption	112
Study of an Axial Micro-Turbine with 1D Model Including Various Fluids or Zeotropic Mixtures and Validated against Experimental Results	113
Impact des conditions d'entrées sur la formation de la thermocline dans le système dual média	114
Vers une meilleure modélisation des MOFs pour les machines à adsorption à basse température	115

Contribution of multiphysics CFD simulation to the reduction of pollutant emissions from domestic heating appliances: application to a pellet stove

Alexandre Briclot¹, Marta Palma², Andrea Tezza², David Frezzato³, Fabio Simonetto², Jaona Harifidy Randrianalisoa¹

* ✉: alexandre.briclot@univ-reims.fr

¹ ITheMM UR7548, Université de Reims Champagne-Ardenne

² Caminetti Montegrappa

³ Invicta

Mots clés : CFD ; Combustion ; Radiation ; Bioenergy ; Decarbonization

Résumé :

Domestic biomass combustion devices, such as pellet stoves, are important heating sources for many European households. For example, 1.7 million households in France are equipped with pellet stoves for heating or domestic hot water supply. However, these installations are source of pollutants such as carbon monoxide CO, nitrogen oxides NOx and fine particle matter PM.

In order to improve the air quality and comply with French and European standards, this study aims to investigate the parameters influencing the efficiency of a pellet stove and its pollutant emissions. To this end, a 3D multiphysics numerical model of an existing pellet stove (NES10 EVO by Caminetti Montegrappa) was developed using the commercial software ANSYS Fluent.

The steady-state CFD model is based on a detailed coupled flow and heat transfer approach (Conduction-Convection-Radiation) and a simplified two-step combustion mechanism, enriched with User-Defined Functions (UDF) to simulate drying, pyrolysis and char oxidation. Particular attention has been paid to the modeling of radiative heat transfer, which plays a key role in combustion. Due to the strong dependence of the radiative properties of combustion products (CO₂, H₂O, soot) on their composition, temperature and partial pressures, a multi-band approach was used. The spectrum was divided into 16 bands between 200 and 10000 cm⁻¹ (i.e., from 1 to 50 μm) in which the absorption coefficient varies with temperature and pressure. The radiative transfer equation was solved using the non-gray Monte-Carlo method. The formation of pollutants such as NOx and soot was also considered.

In parallel, an experimental study was conducted to validate the relevance of the numerical results obtained. A comparison of relevant gas (CO, CO₂, O₂, NOx) concentrations at the stove outlet, flame temperatures at different heights within the appliance and the stove power has demonstrated the suitability of the multiphysics model.

Thermal Analysis of Multilayered Building Walls Using the Thermal Quadrupole Method: Transfer Functions, Convolution-Based Predictions, and Multispot Excitation Scenarios

Mostafa Mortada¹, Vincent Feuillet¹, Laurent Ibos¹, Kamel Zibouche²

* ✉: mostafa.j.m@hotmail.com

¹ Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes

² Centre scientifique et technique du bâtiment

Mots clés : Building walls; Thermal quadrupoles; Transfer functions; Climate data; Multispot excitation

Résumé :

This study focuses on resolving the heat transfer problem in a multilayered building wall using the thermal quadrupole method. This method transforms the governing partial differential equations into algebraic forms in the Laplace domain, enabling efficient computation for complex wall geometries. To establish the relationship between inputs (external temperature and solar flux) and outputs (temperature and heat flux within the wall), transfer functions are derived using simplified input functions, such as sinusoidal variations. These transfer functions allow for the prediction of thermal responses to real climate data by employing convolution products. Real climate data are first fitted into a suitable mathematical function. The convolution of the inverse Laplace-transformed transfer functions with these fitted functions reconstructs the system's thermal behavior in the time domain. The methodology enables systematic analysis of the thermal performance of multilayered walls under realistic environmental conditions, offering a computationally efficient alternative to direct numerical simulations. The results are validated against finite element models and the authors' previous work on incorporating climate data directly into the quadrupole equations, ensuring reliability and accuracy of the proposed approach. Furthermore, the study extends to investigating multispot excitations scenarios for an active method of thermal resistance measurement of walls. This work is conducted within the framework of the RESBIOBAT project funded by the French national research agency (under grant ANR-21-CE22-0018).

Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine à gaz classique : Analyse des performances de combustion et impact de la vapeur d'eau sur les émissions polluantes

Jérémy Bompas¹, Ward De Paepe¹

* ✉: jeremy.bompas@umons.ac.be

¹ UMONS

Mots clés : Combustion Syngaz microturbine

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'identifier le comportement combustible de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une chambre de combustion industrielle, originellement conçue pour le gaz naturel, en variant conjointement la teneur en vapeur d'eau du combustible ainsi que la distribution de puissance entre la flamme pilote et la flamme principale.

Les résultats montrent le champ de vitesse et de température pour une gamme de distribution combustible pilote/principale ainsi que des prédictions précises sur le CO et les NOx.

Il a été montré que les NOx sont particulièrement sensibles aux modifications de distribution de combustible et particulièrement à la richesse locale de la flamme pilote (augmentation de la fraction massique de syngaz dans la zone pilote pour une puissance thermique totale équivalente).

La richesse importante dans la zone pilote favorise la stabilité de la flamme mais rencontre des effets négatifs en augmentant la production de NOx apparaissant dans les zones à très hautes températures.

Il est également montré qu'une teneur en vapeur d'eau plus importante diminue la température globale de la chambre de combustion, pour une même puissance thermique totale injectée, abaissant sensiblement la production de NOx du système.

Ces résultats obtenus pourront servir de références dans la caractérisation de gammes étendues de compositions de syngaz ainsi que de plages de fonctionnement contrôlant la distribution de combustibles flamme pilote/principale vis-à-vis de la stabilité de combustion et des émissions de polluants. Ces spécifications sur une chambre de combustion permettront d'évaluer les points de fonctionnement optimaux pour un cycle complet d'application de cogénération, ce qui permettra d'exploiter entièrement leur potentiel de flexibilité pour des systèmes de faible puissance.

Optimisation des Aéroréfrigérants dans les Usines de GNL : Amélioration des Performances par Aspersions Directe d'Eau

Nicolas Rambure¹, Clément Rongier¹

* ✉: nicolas.rambure@ten.com

¹ Technip Energies

Mots clés : Aéroréfrigérant; évaporation; CFD

Résumé :

La consommation énergétique mondiale a connu une croissance significative au cours des dernières décennies. Parmi les sources d'énergie, le gaz naturel liquéfié (GNL) a pris une place de plus en plus importante, jusqu'à devenir une composante clé du mix énergétique. Occupant environ 600 fois moins de volume qu'en phase gazeuse, le GNL peut être transporté sur de longues distances, ce qui permet de relier facilement les sites de productions aux marchés de consommation.

Une usine GNL est une immense machine thermique où l'échange de chaleur entre fluide procédés et environnement est crucial. Une des solutions classiquement utilisées pour dissiper la chaleur est l'utilisation d'aéroréfrigérants. Cet échangeur offre l'avantage d'être peu onéreux, mais a une emprise au sol importante. Une méthode d'optimisation consiste à exploiter la chaleur latente de vaporisation de l'eau afin d'améliorer les performances des aéroréfrigérants. Pour ce faire, classiquement, de l'eau est pulvérisée dans l'air en amont du faisceau de tubes, ce qui permet de réduire la température de l'air par refroidissement adiabatique. Nous proposons une solution dans laquelle l'eau est directement en contact avec le tube augmentant l'efficacité de la solution et/ou 100% de l'eau est évaporé sans système de recirculation.

Dans cet article, l'étude vise à quantifier l'effet des transferts de chaleur et de masse d'eau sur la performance des aéroréfrigérants. L'approche adoptée consiste à mieux appréhender les phénomènes physiques mis en jeu. Dans un premier temps, un dispositif expérimental a été développé en vue de reproduire le fonctionnement d'un aéroréfrigérant à l'échelle laboratoire pour mieux appréhender l'effet de l'aspersion d'eau sur les tubes et l'augmentation des performances. Dans un second temps, un modèle CFD a été développé en vue de prédire le gain en performance de l'aéroréfrigérant humidifié. Les résultats numériques se sont révélés être en accord avec les données expérimentales.

Étude numérique de l'intensification des échanges dans un absorbeur de capteur solaire

Pascale Bouvier¹, Feriel Yahiat², Serge Russeil³, Daniel Bougeard³

* ✉: pascale.bouvier@junia.com

¹ IMTNE&JUNIA

² IMT Nord Europe&JUNIA

³ IMTNE

Mots clés : Intensification thermique; Centrale Thermodynamique Solaire; Absorbeur; Concentrateur cylindro-parabolique; Tube annulaire déformé

Résumé :

Les centrales thermiques solaires, munies de concentrateurs cylindro-paraboliques, disposent d'un absorbeur. La géométrie de ce dernier est un tube dont la surface est chauffée par le rayonnement solaire qui est concentré par un miroir cylindro-parabolique. L'objectif de notre travail porte sur l'intensification des transferts thermiques au niveau de l'écoulement interne de l'absorbeur du système. Deux configurations géométriques sont étudiées. La géométrie « SIT » (Swirl Internal Tube) où la paroi extérieure est droite de section circulaire tandis que le noyau central génère un mouvement de « swirl ». Et la géométrie « SET » (Swirl External Tube) où c'est la paroi extérieure qui engendre un mouvement de « swirl » tandis que le noyau est rectiligne et caractérisé par une section de passage elliptique. L'étude est menée par voie numérique pour plusieurs nombres de Reynolds, allant de 860 à 70000. Après une validation expérimentale du collecteur solaire SEGS LS-2, la topologie de l'écoulement, le champ de température, le nombre de Nusselt et le facteur de frottement des deux configurations proposées sont examinées. Cette analyse des propriétés de l'écoulement permet d'expliquer les performances thermo-hydrauliques en fonction du nombre de Reynolds.

Simulation numérique 3D et optimisation de l'intensification des échanges thermofluidiques d'un microcanal d'échangeur thermique par micro-structuration des surfaces d'échange

Mickaël Perrin¹, Thierry De Laroche Lambert¹, Yannick Bailly¹, Jean-Claude Roy¹, Ali Ismail¹

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

¹ Institut FEMTO-ST, Département Energie

Mots clés : micro-échangeurs ; micro-structuration ; efficacité d'échangeur ; facteur de performance ; simulation ; optimisation

Résumé :

L'augmentation continue de la densification et des fréquences d'horloge des microprocesseurs et des mémoires, de la puissance volumique de l'électronique de puissance, de la récupération de chaleur des centres de données par les réseaux de chaleur requiert une miniaturisation et une efficacité accrues des micro-échangeurs de chaleur. De plus, la montée en puissance des technologies vertes de co- et tri-génération, de conversion énergétique et de stockage électrochimique nécessite d'intensifier fortement les échanges thermiques aux échelles micro- et millimétriques dans leurs échangeurs, sans pénaliser les gains de puissance thermique par une élévation similaire des puissances mécaniques d'écoulements.

La micro-structuration des surfaces d'échange est une voie prometteuse pour assurer cet objectif de manière passive. L'étude expérimentale d'un micro-échangeur à parois micro-structurées par distribution de cuvettes et protubérances sphériques alternées, conçu et testé au laboratoire, ayant montré une élévation significative de l'efficacité d'échangeur, une exploration théorique et numérique de l'intensification des échanges thermofluidiques par ce type de micro-structuration a été menée au laboratoire.

La simulation numérique 3D d'un écoulement laminaire dans un microcanal a été réalisée avec le code de CFD Ansys Fluent. La recherche d'une micro-structuration optimisée par variation des paramètres géométriques de micro-structuration a permis de montrer leur influence déterminante pour obtenir des facteurs de performance de micro-structuration élevés et de justifier cet effet par la modification des écoulements locaux induite par l'évolution de ces paramètres et du nombre de Reynolds.

Fine characterisation of the solar resource variability in intricate urban environments by means of higher-order modal decomposition

Guillaume F.J. Le Gall¹, Martin Thebault¹, Julien Ramousse¹

* ✉: guillaume.le-gall@univ-smb.fr

¹ Université Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE UMR 5271

Mots clés : Urban environment; Shortwave radiation; Spatiotemporal variability; Morphological and radiative heterogeneity; Higher-Order Singular Value Decomposition (HOSVD)

Résumé :

Helped by the renewable and abundant nature of sun radiation, the production of solar energy on the urban scale forms a core strategy towards more sustainable territories. The morphological variety of three-dimensional structures and radiative diversity of encountered materials yet cause unwanted variations in the solar radiative flux density received by a specific urban region across a wide range of spatiotemporal scales.

The present work uses higher-order modal decomposition to uncover dominant morphological and radiative features on the variability of urban irradiance. The study is conducted on a set of mid-high latitude districts defined as heterogeneous aggregates of cuboid buildings, with differing typological indicators and surface materials. For each geometry, the annual shortwave radiative flux density on all building faces is obtained with a backwards Monte-Carlo method under clear sky conditions. The latter is then arranged as an N-way tensor on the basis of its a priori known space-time characteristics. A Tucker approach is adopted to decompose each tensor field along its dominant patterns of variation via Higher-Order Singular Value Decomposition (HOSVD).

Results prove the benefits of higher-order modal decomposition for providing a rapid and detailed analysis of the solar resource variability in intricate built areas. Dominant modes of variation along individual ways (e.g. space, day of the year, time of the day) are extracted and ranked by order of influence, helping the identification of any variability-prone intra-urban region throughout the year. Information about daily and annual periods of high irradiance variability is obtained, and related changes in its spatial distribution are deduced. Variations in the diffuse radiation component and shadows casted by the blocking of direct sun beams from adjacent obstacles are further portrayed. Disruption of light propagation by prominent geometries and highly-specular materials is especially depicted.

Modélisation nodale d'un transformateurs de traction électriques ferroviaire

Anthony Wassermann¹, Philippe Baucour¹, Dimitri Bonnet¹, Didier Chamagne¹, Brice Jonckheere², Dimitri Mantel²

* ✉: anthony.wassermann@femto-st.fr

¹ Femto-st

² SNCF

Mots clés : transformateur électrique; modélisation nodale; simulation multi-domaines

Résumé :

Les transformateurs de traction électriques utilisés pour l'alimentation des trains sont soumis à des appels de charges importants et non réguliers (pic de courant au passage du train). Localisés le long des voies, ils induisent des contraintes en termes de sollicitations électriques et donc de fréquence d'utilisation. Cela se traduit par un échauffement par effet Joule induisant un vieillissement accéléré et un risque potentiel d'incendie.

Cette étude porte sur la modélisation thermique des transformateurs immergés dans de l'huile naturelle, avec pour objectif un dimensionnement optimal en termes de longévité et de coût. Due à la complexité de leur géométrie et la présence d'huile, le comportement électrothermique peut être appréhendé via des méthodes numériques de type CFD. Cependant, cela nécessite d'importantes ressources de calcul et demande un travail conséquent à chaque changement de géométrie. Nous avons donc opté pour la méthode nodale. Elle est basée sur les circuits équivalents et permet une résolution de l'équation de la chaleur via une analogie électrique.

Ainsi, le transformateur est découpé en plusieurs régions (suivant leurs caractéristiques physiques), pouvant être soumis à plusieurs conditions de transfert thermique. Nous pouvons spécifier les sources et les conditions limites pour chaque région indépendamment du régime (transitoire ou permanent). Ces régions sont interconnectées via des résistances thermiques de contact, ce qui permet de simuler n'importe quelle géométrie 2D. Nous utilisons une méthode implicite inconditionnellement stable avec un maillage quadrilatère linéaire non structuré, cohérent et adaptatif.

Dans un premier temps, le modèle est validé par comparaison avec une solution analytique pour une géométrie simple. Ensuite, un benchmarking de notre outil de simulation est réalisé sur des géométries plus complexes, en régime transitoire et permanent. Enfin des premiers résultats sur un transformateur seront présentés.

Modélisation FEM multi-échelle du transfert thermique lors du processus AFP in-situ sur des composites thermoplastiques

Bruno Storti¹, Adrien Le Reun¹, Steven Le Corre¹

* ✉: bruno.storti@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Énergie de Nantes (LTEN) (Nantes Université - CNRS)

Mots clés : Transfert thermique, Composites thermoplastiques, Méthodologie overset-FEM, Multi-échelle, ALE

Résumé :

La modélisation du transfert thermique durant l'AFP in-situ sur des composites thermoplastiques est complexe en raison de la source de chaleur hautement concentrée, issue de l'absorption laser, qui se déplace à grande vitesse le long des surfaces de contact entre le substrat et la bande entrante. La combinaison d'une vitesse de dépôt élevée et de la faible diffusivité thermique du matériau rend le problème fortement advectif ($Pe \gg 1$), ce qui peut entraîner des instabilités numériques. De plus, la source radiative laser, concentrée sur une zone de l'ordre de quelques dizaines de micromètres selon la distribution des fibres, introduit un problème multi-échelle. Tandis que les techniques eulériennes peuvent traiter des trajectoires simples, des chemins plus complexes nécessitent la flexibilité d'une méthode ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Ce travail propose une méthodologie overset-FEM avec une formulation ALE, combinant un maillage mobile local composé d'éléments de l'ordre du micromètre, pour capturer précisément la source radiative, et un maillage fixe plus grossier, pour définir la géométrie globale. Le modèle intègre les propriétés thermodépendantes du matériau composite et prend en compte l'anisotropie de la conductivité thermique, liée aux conductivités longitudinales et transversales distinctes des fibres. Il considère également la répartition et la fraction volumique des fibres pour modéliser précisément la source de chaleur et homogénéiser le matériau. Les résultats montrent que la méthodologie proposée permet de prédire avec précision les profils de température transitoire dans les composites pendant le processus AFP, offrant ainsi des prédictions fiables sur des phénomènes clés tels que l'adhésion, la cristallinité et les contraintes résiduelles. Elle s'adapte aux pièces complexes et de grandes épaisseurs, démontrant sa robustesse pour divers scénarios de fabrication.

Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans une centrale photovoltaïque flottante : utilisation de la méthode des frontières immergées

Baptiste Berlioux¹, Baptiste Amiot², Martin Ferrand², Joseph Vernier², Rémi Le Berre³, Oume-Lgheit Rhazi³, Hervé Pabiou⁴, Ronnie Knikker¹

* ✉: baptiste.berlioux@edf.fr

¹ INSA-Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, 69100, France

² CEREAs - École des Ponts, EDF R&D Marne la Vallée, 77455, France

³ EDF R&D - Dpt. Technology and Research for Energy Efficiency, Écuellles, 77250, France

⁴ CNRS, INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, 69100, France

Mots clés : CFD;IBM;PV Flottant; transfert de chaleur; évaporation

Résumé :

Les centrales photovoltaïques flottantes (FPV) suscitent un intérêt croissant en raison de leurs avantages combinés : à savoir la production d'énergie renouvelable, le refroidissement des panneaux ou encore la réduction de l'évaporation. La modélisation de ces systèmes à l'aide de la mécanique des fluides numérique (CFD) présente des défis spécifiques, notamment pour capter avec précision les interactions entre les panneaux, l'air environnant et la surface de l'eau. La méthode des frontières immergées (IBM) offre une approche prometteuse dans ce contexte. Les IBM permettent de modéliser avec précision et de façon automatique des géométries complexes sans nécessiter la génération ou la déformation de maillages coûteux en temps ingénieur. Ceci est particulièrement avantageux pour les systèmes FPV, où la géométrie des panneaux et leurs interactions avec l'air jouent un rôle critique dans le transfert de chaleur, les performances aérodynamiques et l'efficacité globale du système. Cette approche sera utilisée pour simuler des phénomènes clés tels que le refroidissement convectif des panneaux, la perturbation du flux d'air et l'impact sur les taux d'évaporation de l'eau. L'objectif de ce travail est d'analyser, à l'échelle d'une centrale photovoltaïque, les échanges thermiques et massiques, et d'optimiser les conceptions des centrales FPV pour améliorer leur rendement énergétique et leurs bénéfices environnementaux. La méthode numérique sera mise en œuvre et validée par confrontation à des essais en soufflerie disponibles dans la littérature. Puis, un test de faisabilité appliqué au PV flottant sera présenté.

Etude de la convection naturelle turbulente dans un bain liquide élargé et chauffé en volume

Thibault Desaleux¹, Rémi Clavier¹, Barbara Bigot¹, Rémi Zamanski²

* ✉: remi.clavier@cea.fr

¹ CEA, DES, IRESNE, DTN, SMTA, LMAG (Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves), Cadarache, France

² Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, CNRS INPT UPS, Toulouse, France

Mots clés : Turbulence; Nucléaire; Corium

Résumé :

Le développement et la structure de la turbulence dans une cellule thermo-convective avec chauffage interne en volume ont reçu une attention moindre, de la part de la communauté scientifique, que dans d'autres cas plus courants (Rayleigh-Bénard) avec chauffage externe par les parois. Si cette différence s'explique notamment par la relative rareté de situations de convection naturelle où la puissance provient du fluide lui-même, leur étude reste nécessaire pour certaines applications spécifiques. En particulier, les études de sûreté nucléaires relatives aux accidents graves nécessitent des évaluations précises des échanges thermiques aux parois d'un bain de corium liquide issu de la fusion du cœur du réacteur, caractérisé par une très haute température (>3000 K), un nombre de Prandtl proche de l'unité ($0,5-5$), une forte réactivité chimique et surtout une puissance spécifique importante ($10-100$ W/cm³). La convection induite par cette puissance présente une forte turbulence, caractérisée par le nombre de Rayleigh "interne" du bain liquide, compris entre 10^8 et 10^{17} . Des approches numériques directes couplant l'entièreté de la physique du corium sont irréalisables à ces niveaux de Rayleigh, mais sont envisageables pour des cas moins complexes, ne prenant en compte qu'une partie de la physique, dans des configurations idéalisées. Des DNS représentatives de la partie liquide d'un bain de corium homogène sont ainsi réalisées avec l'outil TRUST-TrioCFD développé par le CEA. Elles apportent un éclairage nouveau et complémentaire par rapport aux expériences sur la structure interne du bain de corium et les transferts thermiques à ses parois. Elles permettront aussi d'asseoir des modèles de turbulence adaptés à cette situation (RANS), à intégrer dans des modélisations plus complètes de la physique du problème. Des analyses sont en cours afin de tester la validité des hypothèses classiques des approches RANS existantes et d'identifier les améliorations à y apporter.

Thermique par Monte-Carlo : modèles pour l'anisotropie et le rayonnement dans un milieu chauffant

Mathis Boiteau¹

* ✉: mathis.boiteau@edf.fr

¹ EDF R&D , LAPLACE

Mots clés : Couplage ; Monte-Carlo ; Conduction ; Anisotropie ; Non-linéaire ; Rayonnement

Résumé :

La thermique se trouve au centre des préoccupations d'un énergéticien comme EDF. Malgré les performances des approches classiques, un besoin se fait ressentir pour certains passages à l'échelle et pour gérer une complexité géométrique croissante. Une approche basée sur la méthode de Monte-Carlo semble prometteuse, mais elle nécessite de surmonter certains verrous.

Les travaux présentés sont effectués dans le cadre d'une thèse portant sur la simulation numérique de problèmes couplés en transferts thermiques par Monte-Carlo appliqué aux réacteurs à haute température. Deux modèles probabilistes sont proposés ici. Le premier pour résoudre un problème de conduction dans un matériau anisotrope et le second pour résoudre un problème couplant le rayonnement aux parois avec la conduction dans un milieu chauffant.

Le poster présentera la technologie des réacteurs à haute température, pour donner le contexte motivant cette thèse. Les spécificités abordées seront l'utilisation de l'hélium comme caloporteur et le fait que le combustible soit composé de petites particules d'uranium dans une matrice en graphite, ce qui introduit des rapports d'échelle très importants.

Les deux propositions de modèles ainsi que quelques éléments théoriques servant de contexte seront présentés. Le problème de l'anisotropie est abordé avec une approche tensorielle. La méthode proposée utilise des changements de base afin d'obtenir des expressions similaires au cas isotrope.

Le problème du couplage entre sources de chaleur volumiques et rayonnement non-linéarisé sera ensuite abordé. Jusqu'à présent, différentes méthodes utilisées étaient incompatibles. Une nouvelle approche est présentée ici au travers de deux concepts. Le premier permet de lever la nécessité de déterminer un majorant pour les collisions nulles et le second assure que l'algorithme converge en variance.

Les résultats numériques obtenus seront comparés aux résultats obtenus avec le code de thermique SYRTHES dans un cas simple.

Modélisation dynamique et optimisation d'un stockage thermique par adsorption

Alix Untrau¹, Lorenz T. Biegler², Sabine Sochard¹

* ✉: alix.untrau@univ-pau.fr

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

² Carnegie Mellon University, Department of Chemical Engineering

Mots clés : Chaleur solaire ; stockage thermique ; adsorption ; simulation dynamique ; optimisation

Résumé :

La fourniture de chaleur renouvelable pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment. L'utilisation de l'énergie solaire thermique requiert un stockage d'énergie thermique pour pallier l'intermittence de la ressource solaire. Certains bâtiments, individuels ou collectifs, présentent des contraintes d'encombrement, il est alors nécessaire d'utiliser une technologie de stockage thermique compacte et à haute densité énergétique. Le stockage thermique par adsorption est prometteur pour cette application. Cette étude considère un système ouvert, utilisant une zéolithe 13X comme adsorbant et l'eau contenue dans l'air humide comme soluté. Un modèle dynamique 1D a été développé pour ce stockage, utilisant l'approche LDF (Linear Driving Force) pour représenter la résistance au transfert de matière et l'isotherme d'Aranovich-Donohue pour représenter l'équilibre d'adsorption. Ce modèle détaillé considère la densité du fluide et sa vitesse variable, ainsi qu'un paramètre LDF dépendant de la température et de la concentration du fluide en eau. La méthode de discrétisation spatiale est les volumes finis. Une étude rigoureuse a été menée pour simplifier le modèle sans perdre en précision afin de réduire les temps de calcul. Ainsi, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été adoptées : propriétés thermophysiques constantes, transfert de chaleur entre le fluide et le solide instantané résultant en l'égalité des températures du fluide et du solide, dispersion axiale négligée. Le modèle a été validé grâce à des données expérimentales issues de la littérature. Ce modèle peut maintenant être utilisé pour des études d'optimisation du dimensionnement du système (hauteur du stockage) et de son fonctionnement dynamique (vitesse du fluide en entrée) en considérant plusieurs objectifs (coûts d'investissement, de fonctionnement, suivi de la demande en chaleur).

Study of an Axial Micro-Turbine with 1D Model Including Various Fluids or Zeotropic Mixtures and Validated against Experimental Results

Robin Gautier¹, Nicolas Tauveron²

* ✉: robin.gautier@cea.fr

¹ CEA grenoble

² CEA Grenoble

Mots clés : ORC; Axial Turbine; Zeotropic Mixture; 1D model; Experimental

Résumé :

A 1D multi-fluid performance prediction model has been developed using an original approach that combines various methods from the literature. It has been compared with a great number of experimental results from tests involving five different fluids or mixtures and has demonstrated a strong ability to accurately predict turbine internal efficiency (± 5 efficiency points and $\pm 15\%$ internal power), regardless of the fluid. This accuracy is particularly notable since most of the tested points are in severe off-design conditions. Moreover, the higher the efficiency, the better the accuracy, suggesting a very good capability of the model in more conventional operating conditions. Therefore, further experimental work is needed at better operating points to complete this validation. Additionally, the comparison between numerical and experimental mass flowrates has highlighted the necessity of considering the pressure ratio across the turbine when determining nozzle efficiency. Finally, the partial admission model composed in this study seems to be relevant but require more investigation at better operating range and with other partial admission.

Further work is under study with a second turbine(5kWe). Also a two-phase behavior in the turbine's injector is being implemented into the model.

Impact des conditions d'entrées sur la formation de la thermocline dans le système dual média

Armand Korsaga¹, Benoit Stutz², Tizane Daho¹

* ✉: benoit.stutz@univ-smb.fr

¹ Université Joseph Kl-ZERBO, Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE)

² LOCIE - USMB

Mots clés : stockage thermique, thermocline,

Résumé :

Le solaire thermodynamique présente des perspectives prometteuses dans le contexte africain que ce soit pour produire de la vapeur pour les industries agroalimentaires en générale et la production d'huile végétale en particulier, et ou la production d'électricité. Ce système nécessite d'intégrer un stockage thermique pour pallier à la variabilité de la ressource solaire. On s'intéresse dans cette étude, un stockage thermique de type thermocline mettant en œuvre des matériaux locaux (huiles de ricin et balanites avec des boules de céramiques).

La prévision efficace du comportement du système de stockage thermocline dual media est toujours problématique. La modélisation numérique est l'un des moyens pour appréhender les phénomènes régissant les profils de température dans ce type de stockage telle que la stratification. Or, les modèles numériques développés antérieurement sont focalisés sur la partie lit de roche, et ne parviennent donc pas à décrire le comportement thermique des volumes de liquides qui sont localisés de part et d'autre du lit de roche. Notre étude a pour objectif d'améliorer la prédiction des performances du système en tenant compte des problèmes de stratification dans les parties bombées supérieures et inférieure. Pour se faire, une simulation CFD sur Comsol est faite dans un premier temps pour appréhender les phénomènes de turbulences provoqué par l'injection du fluide, contrôlé par la géométrie du fond bombé, et qui sont aussi à l'origine de la formation de la thermocline. Cela permettra dans un deuxième temps de définir un coefficient de diffusivité turbulente pour un modèle simplifié 1D qui sera couplé au modèle existant afin de capturer le comportement du système de stockage dans sa globalité.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence (ANR-18-EURE-0016 – Solar Academy) et par ERASMUS+MIC, bourse de mobilité européenne

Vers une meilleure modélisation des MOFs pour les machines à adsorption à basse température

Amín Altamirano¹, Francis Meunier¹, Orhan Talu², David Farrusseng³, Céline Daniel³

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

¹ Lafset, Cnam

² Cleveland State University

³ Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, IRCELYON, UMR 5256

Mots clés : adsorption, sorption, Metal–Organic Frameworks (MOFs), isotherme, cycle

Résumé :

Les matériaux de type MOF (Metal–Organic Frameworks) suscitent un intérêt croissant pour les machines à adsorption, en raison de leur structure poreuse hautement modulable et de leur capacité remarquable à adsorber de grandes quantités de vapeur d'eau à très basse pression. Cette propriété ouvre la voie à la valorisation de sources de chaleur de très basse température, encore peu exploitées, pour la production de froid ou la récupération de chaleur. Toutefois, la complexité structurale des MOFs rend leur modélisation délicate avec les approches conventionnelles, limitant ainsi leur intégration optimale dans les systèmes énergétiques.

Ce travail en cours présente certains résultats d'un projet visant à représenter fidèlement les équilibres d'adsorption/désorption de couples de travail à base de MOFs sur une large plage de températures. Pour cela, des méthodes innovantes de modélisation thermodynamique sont développées et évaluées. Ces modèles sont ensuite intégrés à la simulation de cycles à adsorption intermittents, explorant différentes configurations orientées vers des applications variées (froid, stockage de chaleur, couplages hybrides, etc.).

Thème 6

Méetrologie et Techniques Inverses

Caractérisation des propriétés thermiques d'un matériau composite thermoplastique	118
Optimizing climate data integration for thermal properties characterization in building walls: A comparative investigation of fitting techniques and inversion algorithms using thermal quadrupoles	119
A novel parametric spectral technique to solve inverse heat problems for the estimation of wall thermophysical properties	120
Caractérisation de matériaux à changement de phase solide-liquide par bilan entropique	121
Utilisation de modèles analytiques pour les procédés de thermoablation	122
Estimation of the heat flux imposed by a diode-laser on a paste	123
Estimation of infrared detector bandwidths and effect on the Pulsed Periodic Photothermal Radiometry performance	124
Pour une estimation simultanée des conductivités de matériaux orthotropes par thermographie . . .	125
Caractérisation thermo-physique d'un matériau à changement de phase avec surfusion incluant l'évaluation du flux dissipé lors de la phase de recalescence	126
Imagerie thermique super résolue par méthode de Compressive Sensing	127
Développement d'une méthode Fluxmétrique avec prise en compte des pertes latérales pour l'estimation de conductivités thermiques	128
Mesure thermo-rhéologique des écoulements polymères : avancées scientifiques et application aux procédés d'injection	129
Estimation tridimensionnelle de densité de flux de chaleur par méthode séquentielle de spécification de fonction avec régularisation	130
Identification de la conductivité thermique d'un composite à matrice thermodurcissable en cours de réticulation	131
Experiment-based Reduced Order Model by MIM applied to empty beehives for temperature prediction	132
Identification de la thermo-dépendance de la conductivité de matériaux isolants par modèles réduits modaux	133
Validation d'une instrumentation low-cost pour l'étude d'un générateur d'eau atmosphérique	134
Développement d'une méthode flash face avant pour l'étude thermique des dépôts de surface des composants en contact avec le plasma dans les tokamaks	135

Caractérisation des propriétés thermiques d'un matériau composite thermoplastique

Philippe Reulet¹, Morgane Veca¹

* ✉: philippe.reulet@onera.fr

¹ Onera/DMPE, Université de Toulouse

Mots clés : matériau composite ; propriétés thermochimique ; propriétés thermophysiques ; modèle de dégradation

Résumé :

Le comportement des matériaux aéronautiques soumis au feu est étudié dans le but de mieux préparer la certification des structures pour les applications avion ou moteur. L'apparition de matériaux composites a permis de développer de nouvelles structures plus légères. Il est alors nécessaire de comprendre les phénomènes qui se produisent lorsqu'ils sont soumis à un événement feu.

Dans le cadre du projet PHYFIRE2, un matériau composite thermoplastique a été complètement caractérisé du point de vue de ses propriétés thermiques. Le comportement thermochimique est étudié à très petite échelle pour identifier un modèle de dégradation par des essais dans un analyseur thermogravimétrique. Cet instrument permet de caractériser la perte de masse en fonction de la température et sous atmosphère inerte ou oxydante pour séparer les différentes réactions chimiques. Dans un deuxième temps, les essais sont réalisés à l'échelle du matériau pour caractériser la conductivité thermique orthotrope et la capacité calorifique, en fonction de la température. Un faisceau laser de faible puissance est utilisé pour chauffer l'échantillon et la température de la face opposée est acquise par thermographie infrarouge. Une méthode d'optimisation permet l'identification simultanée des quatre propriétés thermophysiques recherchées. Pour mener à bien ces essais, il est nécessaire d'effectuer une caractérisation préalable des propriétés thermo-optiques pour connaître l'émissivité spectrale.

Le matériau sélectionné présente trois réactions de dégradations successives : pyrolyse de la résine qui crée un résidu nommé char, puis deux réactions d'oxydation du char et des fibres. Le matériau se présente donc sous deux états : matériau vierge (résine + fibres) et matériau dégradé (char + fibres). Pour que le modèle thermique soit complet, les essais de caractérisation des propriétés thermophysiques doivent être réalisés sur les états vierge et dégradé.

Optimizing climate data integration for thermal properties characterization in building walls: A comparative investigation of fitting techniques and inversion algorithms using thermal quadrupoles

Mostafa Mortada¹, Vincent Feuillet¹, Laurent Ibos¹, Kamel Zibouche²

★ ✉: mostafa.j.m@hotmail.com

¹ Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes

² Centre scientifique et technique du bâtiment

Mots clés : Building walls; Thermal quadrupoles; Climate data; Integral Transforms; Inversion algorithms; Computation time

Résumé :

Solving the heat equation is fundamental in various applications, with methods ranging from analytical solutions under simplified assumptions to numerical approaches for complex scenarios. The thermal quadrupole method offers a unique advantage by transforming the heat equation into a linear system using Laplace and integral transforms (for time and space domains), providing efficient solutions for multilayered building walls. This work incorporates real climate data—hourly external temperatures and solar heat flux—into the quadrupole model, where the wall is represented as a 2D axisymmetric cylinder, necessitating Hankel transforms for spatial resolution in the radial direction. Climate data, characterized by significant fluctuations, are fitted for transformation using either Fourier series fitting or a segmented discrete Laplace transform method. After solving in the transformed domain, inversion to the original time-space domain is performed using Stehfest, De Hoog, and Den Iseger algorithms. A parametric analysis evaluates the performance of various fitting and inversion combinations. Results are compared with finite element solutions (COMSOL), emphasizing computational efficiency and accuracy. In addition to this cylindrical multilayer wall application, the study extends to testing fitting techniques and inversion algorithms on a 1D problem. This problem, solved with quadrupoles and through FreeFEM++, provides a baseline for assessing the robustness of the proposed methodologies. The comparative study highlights the reliability of the combined fitting and inversion approaches under diverse problem settings. This work is conducted within the framework of the RESBIOBAT project funded by the French national research agency (under grant ANR-21-CE22-0018).

A novel parametric spectral technique to solve inverse heat problems for the estimation of wall thermophysical properties

Suelen Gasparin¹, Julien Berger², César Pacheco³, Helcio Orlando⁴

* ✉: suelen.gasparin@cerema.fr

¹ Cerema, Equipe de recherche BPE, Ministère de la transition écologique

² : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université, CNRS.

³ LATERMO, Department of Mechanical Engineering, Federal Fluminense University

⁴ COPPE, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio De Janeiro

Mots clés : inverse heat transfer ; thermophysical parameter estimation; conjugate gradient-based method; parametric spectral technique;

Résumé :

Determining the thermophysical properties of building walls, such as thermal conductivity and heat capacity, is critical for assessing energy performance and optimizing thermal efficiency. This work presents a novel approach for estimating these properties by combining a gradient-based method with a parametric spectral reduced order model. The solution of the direct problem is decomposed according to space, time and the diffusivity. Then, this parametric model is used to compute off-line the iso-lines of the cost function gradient. It enables a faster convergence of the inverse problem algorithm. To evaluate the proposed technique, a benchmark is considered using synthetic data, ensuring a controlled environment for testing accuracy and robustness. Then, a real case-study in a historical wall is considered to retrieve the thermal conductivity of each layer based on temperature measurement obtained during a one-year monitoring. The results indicate that this method offers substantial potential for applications in building diagnostics and energy efficiency evaluation, providing a reliable tool for characterizing wall thermophysical properties in various structural contexts.

Caractérisation de matériaux à changement de phase solide-liquide par bilan entropique

Régis Olivès¹, Jean-Marie Mancaux¹

* ✉: olives@univ-perp.fr

¹ PROMES-CNRS - Université de Perpignan Via Domitia

Mots clés : caractérisation thermophysique; matériau à changement de phase; bilan entropique; stockage thermique

Résumé :

L'intégration de stockage d'énergie dans les procédés solaires s'avère nécessaire pour pallier aux intermittences et aux fluctuations de la ressource solaire. Dans le cas de module de stockage thermique à chaleur latente, les performances sont étroitement liées aux propriétés de stockage et de transfert des matériaux à changement de phase. L'étude du bilan entropique se révèle pertinent afin d'identifier ces propriétés. Précédemment, nous avons montré que la résolution de l'équation de bilan entropique peut conduire à l'identification de propriétés thermophysiques de matériaux solides telles que l'effusivité et la conductivité. Nous étendons ce type de mesure aux matériaux à changement de phase solide-liquide. La méthode expérimentale consiste en la mesure et le traitement des températures superficielles et des flux de chaleur sur un matériau soumis à une sollicitation dynamique. Ainsi, le banc expérimental est constitué d'un échantillon placé entre deux parois dont on peut faire varier la température. Un capteur planaire inséré entre la paroi et l'échantillon mesure à la fois le flux et la température.

On effectue le bilan entropique lors d'une transformation obtenue par variation du flux et de la température en paroi autour de la température de changement de phase. En réalisant une transformation de type cycle avec retour à l'état initial, la production d'entropie est égale au signe près à l'entropie échangée avec l'extérieur. Or il est possible d'exprimer l'entropie échangée en distinguant l'entropie liée au stockage et celle liée au transfert. À partir de ce bilan entropique, les propriétés de transfert et de stockage sont identifiées au passage du front de fusion. On compare les résultats obtenus sur des matériaux à changement de phase à base de paraffine telle que RT28 (Rubitherm).

Utilisation de modèles analytiques pour les procédés de thermoablation

Jean-Luc Battaglia¹, Valery Ozene², Ida Burgers¹, Mariana De Melo Antunes³

* ✉: jean-luc.battaglia@u-bordeaux.fr

¹ Université de Bordeaux, I2M

² CRMSB

³ Federal University of Itajubá (UNIFEI)

Mots clés : Thermoablation, tumeurs, thermométrie IRM, méthodes inverses

Résumé :

La thermoablation est une méthode chirurgicale consistant à réaliser la coagulation de tumeurs cancéreuses par des sources thermiques. Ces sources peuvent être générées de différentes façon selon le type et la dimension de la tumeur : radiofréquence, laser, micro-ondes, ondes acoustiques. Ce procédé chirurgical est aujourd'hui assisté par thermométrie sous IRM. Ceci permet de quantifier le niveau de température au cours du processus dans la zone d'intérêt. De nombreuses avancées restent néanmoins à atteindre afin de rendre ce procédé chirurgical optimal et personnalisable. L'innovation présentée dans cette communication vise à transformer la pratique chirurgicale en proposant de reconstruire en temps réel le champ thermique et le domaine endommagé dans la zone traitée. La méthodologie sous-jacente repose sur l'identification de la répartition spatio-temporelle de la source de chaleur au sein des tissus conduisant à la reconstruction du champ thermique avec une résolution spatiale supérieure à celle du voxel de l'imagerie thermique. Cette super-résolution permet non seulement de quantifier précisément l'extension de la zone endommagée au cours du processus mais aussi de garantir le non-dépassement de la température d'ébullition en tout point. Cette reconstruction du champ thermique s'opère notamment à proximité du dispositif où les artefacts d'imagerie sont les plus présents et où les gradients thermiques sont les plus grands. Afin de réaliser cette identification/reconstruction en temps réel, une méthode d'inversion des mesures de thermométrie IRM est mise en œuvre en se basant sur un modèle analytique des phénomènes thermiques dans la zone traitée. Une application particulière basée sur le procédé de thermoablation par micro-ondes sera présentée dans cette communication.

Estimation of the heat flux imposed by a diode-laser on a paste

Cristiano Henrique Figueiredo Pereira Da Silva Jr.¹, Dorian Barrettapiana², Modesto José Luis Da Gama¹, Helcio R. B. Orlande¹

* ✉: helcio@mecanica.coppe.ufrj.br

¹ PEM/COPPE – Federal University of Rio de Janeiro, UFRJ

² École Polytechnique Universitaire de Marseille

Mots clés : parameter estimation; classical techniques; Bayesian statistics; diode-laser; paste

Résumé :

In this work, the heat flux imposed by a diode-laser on the surface of a paste sample was estimated by solving an inverse parameter estimation problem. The inverse problem was solved with temperature measurements taken over the heated surface of the sample by an infrared camera. The mathematical model involved heat conduction in the material, by assuming that the diode-laser heat flux was totally absorbed on its surface, which was painted with graphite ink. Based on the qualitative information provided by the temperature measurements, the diode-laser heat flux on the boundary was approximated by a Gaussian function. The parameters of this function, namely the central heat flux and the decay factor, were estimated with classical and Bayesian techniques. The classical techniques included the Levenberg-Marquardt and the conjugate gradient method of minimization of the least squares-norm. The Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method implemented via the Metropolis-Hastings algorithm was applied for the solution of the inverse problem within the Bayesian framework of statistics. The sensitivity coefficients were analyzed in this work. While some judged known model parameters, such as the material properties, were deterministically fixed for the application of the classical techniques, their related uncertainties were statistically modeled through the prior distributions for the MCMC method based on independent measured data. The results obtained with the different methods are discussed and compared in the paper, and the residuals between measured and estimated temperatures are analyzed. This work is part of a project for the selection/development of materials for 3D printing of phantoms that can mimic biological tissues, for the study of the thermal treatment of cancer.

Estimation of infrared detector bandwidths and effect on the Pulsed Periodic Photothermal Radiometry performance

Emmanuel Ruffio¹, Clément Chassain², Andrzej Kusiak², Jean-Luc Battaglia²

* ✉: emmanuel.ruffio@alt-rd.com

¹ CoActions-AltRD

² I2M - UMR 5295

Mots clés : infrared detector; high-speed amplifier; response time; material characterization; experiment design

Résumé :

The Pulsed Periodic Photothermal Radiometry (PPTR) setup in front face configuration (FF-PPTR) allows the investigation of multi-layered samples with layer thicknesses of a few hundred nanometers. The characteristic conduction time in such thin layers may be in the order of magnitude of 10 nanoseconds. In such conditions, the estimation of the thermal properties and/or thermal contact resistances requires a measurement system with a minimum cutoff frequency of about 100 MHz. The bandwidth of the FF-PPTR method depends on several critical components: infrared detector bandwidth, amplifier bandwidth and acquisition system bandwidth. Moreover, the laser pulse is another key element since it must be short enough to ensure that high frequencies actually exist in the thermal excitation.

In this work, a spectral analysis of these different elements is carried out. Since photovoltaic infrared (IR) detectors exhibit variable response times depending on their size and technology, a comparison of the response time of several detectors is done. They are measured using a reference sample submitted to laser pulses (Coherent Nd:YAG diode-pumped laser) and by using a new high-speed amplifier (1.4E6 V/A@40 MHz) developed by Alt-RD company. The Kolmar detector KMPV11 with its own integrated amplifier is included in the benchmark. An electrical model of the Alt-RD amplifier is introduced and combined to the heat transfer model of a multilayer sample. An experiment design analysis is then performed to identify the optimum laser pulse width and the detector cut-off frequency that minimize the uncertainty of the estimated thermal diffusivity. Finally, the frequency content of the laser pulse is estimated based on the laser pulse-shape measured by a fast photodiode (THORLABS DET10) with 1 nanosecond rise time.

These results are presented and discussed to derive their effect on the performance of the FF-PPTR method.

Pour une estimation simultanée des conductivités de matériaux orthotropes par thermographie

Thomas Pierre¹, Helcio R. B. Orlando², Philippe Le Masson¹, Edouard Geslain¹, Coline Bourges¹

* ✉: thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud - IRDL

² Université Fédérale de Rio de Janeiro, Politécnica/COPPE

Mots clés : Matériaux orthotropes; conductivités; techniques inverses; transformation intégrale; méthode bayésienne; thermographie

Résumé :

Les premiers développements vers l'utilisation d'une seule caméra infrarouge pour observer quatre surfaces d'un solide orthotrope sont rapportés dans ce travail. L'objectif principal est d'estimer les trois composantes de la conductivité thermique du solide orthotrope, sous la forme d'un parallélépipède. L'une des surfaces du solide est chauffée par un laser, tandis que les autres échangent de la chaleur par convection et rayonnement avec l'environnement. Les mesures de température prises avec la caméra infrarouge sur la surface chauffée sont utilisées comme condition limite, tandis que les mesures prises sur trois autres surfaces sont utilisées pour la résolution d'un problème inverse. Une transformation intégrale est appliquée sur les mesures utilisées pour l'analyse inverse, en utilisant les valeurs propres liées au problème de conduction thermique original. Peu de modes transformés sont utilisés pour la résolution du problème inverse, compressant ainsi spatialement les données fournies par la caméra infrarouge. Le problème inverse est résolu méthode bayésienne, en appliquant l'algorithme de Metropolis-Hastings avec échantillonnage séquentiel dans deux jeux de paramètres du modèle (paramètres d'intérêt et autres).

Caractérisation thermo-physique d'un matériau à changement de phase avec surfusion incluant l'évaluation du flux dissipé lors de la phase de recalescence

Gilles Fraisse¹, Mickael Pailha¹, David Cloet¹, Laurent Zalewski²

* ✉: fraisse@univ-smb.fr

¹ Université Savoie Mont Blanc , LOCIE

² Université d'Artois, LGCgE

Mots clés : Matériau à changement de phase ; caractérisation ; méthode inverse

Résumé :

Les matériaux à changement de phase (MCP) présentent des comportements thermodynamiques pouvant être complexes particulièrement en présence de surfusion. Les phénomènes de fusion et cristallisation peuvent être caractérisés selon différentes approches. Elles sont basées soit sur des lois de comportement traduisant les cinétiques de cristallisation avec l'évaluation de la fraction solide en fonction du temps et de la température (modèles du type Avrami ou Nakamura) ou par mesure de flux sur un échantillon soumis à des sollicitations thermiques permettant d'identifier notamment la courbe caractéristique enthalpie-température. Cette seconde approche est possible sur des volumes de MCP très différents : de quelques milligrammes dans le cas de la DSC à plusieurs centaines de grammes dans le cas de l'identification par méthodes inverses sur banc expérimental fluxmétrique. Dans tous les cas, une caractérisation précise de la courbe enthalpie-température lors des phases de fusion et solidification complètes ou partielles constitue un enjeux scientifique important pour évaluer correctement la performance énergétique de dispositifs avec stockage latent.

Dans notre étude, une cavité parallélépipédique en cuivre de $9 \times 9 \times 0.5 \text{ m}^3$ contenant du PEG6000 est soumise sur ses deux plus grandes faces à un flux de chaleur afin d'identifier par méthode inverse les lois de comportement analytiques relatives à l'enthalpie, la fraction liquide et la chaleur spécifique équivalente. Le chauffage est assuré par des plaques résistives, tandis que le refroidissement dépend du coefficient de pertes thermiques lié à l'isolation entourant la cavité. La température au sein du MCP est considérée uniforme compte tenu de la faible épaisseur de la cavité et égale à celle des plaques de cuivre. Le comportement thermique dynamique de la cavité vide est préalablement déterminé. Les résultats présentés pour le PEG6000 incluent l'identification du flux de chaleur dissipé dans le MCP pendant la recalescence.

Imagerie thermique super résolue par méthode de Compressive Sensing

Florian Crouau¹, Stéphane Chevalier¹, Jérémie Maire¹, Jean-Luc Battaglia¹

* ✉: florian.crouau@u-bordeaux.fr

¹ Université de Bordeaux - I2M

Mots clés : Méthodes inverses ; Super résolution ; imagerie ; compressive sensing ; Digital Micromirror Device ;

Résumé :

En imagerie, la résolution spatiale est limitée par le montage instrumental, que ce soit dû à l'échantillonnage ou à la limite de diffraction associée au système optique. La distance minimale de résolution est donc imposée en fonction des systèmes soit par la distance entre deux pixels sur la caméra via le théorème de Shannon, soit par le rapport entre la longueur d'onde et l'ouverture numérique du système optique d'après la loi d'Abbe.

Il existe toute une gamme de méthodes afin de répondre à l'un ou l'autre de ces deux problèmes. En particulier pour le problème de l'échantillonnage la théorie dite du « Compressive Sensing » a servi de base ces dernières décennies pour développer des techniques permettant de s'affranchir de la limite imposée par le théorème de Shannon. Les « Single-Pixel Camera » en sont la première et principale illustration, le principe étant de reconstruire une image à partir d'une série de mesures sur un monodétecteur à l'aide d'un objet structurant la lumière de façon connue en amont du capteur. L'un des avantages étant que le nombre de mesures pour obtenir une bonne reconstruction d'image est inférieur au nombre de points total de l'image obtenue.

Ici, nous présentons une variante de ces techniques à l'aide d'un DMD (Digital Micromirror Device), permettant de structurer le signal lumineux de façon connue, et d'une caméra infrarouge dont les pixels sont comparativement plus larges. Cet ensemble est utilisé pour imager des objets éclairés à l'aide d'une source émettant dans l'infrarouge moyen. Enfin, ces séries d'images mesurées et de motifs envoyés au DMD sont utilisées pour reconstruire une image de plus haute résolution que celle de la caméra via une méthode de minimisation à l'aide d'une méthode du lagrangien augmenté.

Développement d'une méthode Fluxmétrique avec prise en compte des pertes latérales pour l'estimation de conductivités thermiques

Abdelbassat Ababsa¹, Jean-François Henry², Christophe Rodiet²

* ✉: christophe.rodiet@univ-reims.fr

¹ Chercheur Indépendant

² ITheMM

Mots clés : Conductivité thermique ; Plan chaud ; Méthodes inverses ; Méthode Fluxmétrique ; Matériaux isolants

Résumé :

Le contexte de cette étude est celui de l'estimation de conductivité thermique de matériaux faiblement conducteurs de la chaleur.

De nombreuses méthodes de caractérisation thermique existent et peuvent globalement être regroupées en deux grandes classes de méthodes, les méthodes en régime permanent, et celles en régime transitoire.

En régime permanent il sera par exemple, impossible d'estimer la diffusivité ou l'effusivité thermique des matériaux, en revanche ces méthodes sont particulièrement adaptées pour l'estimation de très faibles conductivités thermiques.

Parmi les méthodes en régime permanent de nombreuses méthodes existent, tels que les méthodes de plaque chaude gardée (faisant généralement référence), de plan, ruban, ou encore tube chaud, et les méthodes fluxmétriques.

Ces méthodes reposent sur le principe de la mesure d'écart de température entre les faces de l'échantillon et la mesure du flux le traversant, permettant ainsi la détermination de la résistance thermique totale entre ces deux isothermes. Cependant, ces méthodes nécessitent généralement de pouvoir négliger les résistances thermiques de contact, ainsi que les pertes latérales ayant lieu avec l'environnement, ce qui impose des conditions expérimentales et de traitement spécifique du signal.

C'est donc dans ce cadre, qu'une méthode d'estimation de conductivité thermique par méthode fluxmétrique prenant en compte les pertes latérales est développée, afin de d'améliorer la précision des résultats et d'élargir les conditions opératoires expérimentales. Le dispositif utilisé a la particularité d'utiliser des capteurs de températures et de flux bi-surfaciques circulaires composés de deux zones sensibles : une zone centrale et une autre zone périphérique annulaire de rayon extérieur égal à celui de l'échantillon permettant de prendre en compte les flux et pertes radiales (latéral). Une validation numérique de la méthode sera réalisée.

Mesure thermo-rhéologique des écoulements polymères : avancées scientifiques et application aux procédés d'injection

Qiao Lin¹, Pierre Mousseau¹, Nadine Allanic¹, Yannick Madec¹, Julien Launay¹

* ✉: NADINE.ALLANIC@UNIV-NANTES.FR

¹ GEPEA

Mots clés : viscosité, dissipation visqueuse, polymère

Résumé :

Dans le domaine de la plasturgie, de nombreux industriels sont confrontés d'une part à améliorer les performances de leur chaîne de production et d'autre part à les adapter à l'utilisation de nouveaux matériaux. Des changements de matière qui sont liés à de nouvelles contraintes produites, des difficultés d'approvisionnement, des évolutions sanitaires (agroalimentaire, santé) et environnementales (introduction de matériaux polymères recyclés, utilisation de matériaux biosourcés).

Les polymères ont un comportement en écoulement non-newtonien. De ce fait, les réglages lors d'un procédé d'injection (température, pression, vitesse d'injection, ...) dépendent fortement de la viscosité du polymère mise en œuvre et ce d'autant plus si celle-ci est thermodépendante.

Lors de travaux précédents, un dispositif de mesure annulaire (TRAC : Thermo-Rheo Annular Cell) a été proposé pour une mesure de température très robuste et une identification de la viscosité par méthode inverse, qui exploite la dissipation visqueuse dans l'écoulement. Le système de mesure thermique est suffisamment sensible pour permettre de prédire la thermodépendance de la viscosité, exprimée sous forme d'énergie d'activation.

Dans ce travail, nous expliquons comment les points critiques de viscosité, identifiés grâce à la TRAC, peuvent être utilisés pour estimer la viscosité en ligne et présentons les premiers résultats de mesure obtenus lors de cycles d'injection. Ces résultats représentent non seulement une avancée significative pour le domaine industriel de la plasturgie mais ils permettent aussi de mettre en avant scientifiquement l'impact de la compressibilité sur la mesure thermique des écoulements.

Estimation tridimensionnelle de densité de flux de chaleur par méthode séquentielle de spécification de fonction avec régularisation

Lamia Atmani¹, Elodie Courtois¹, Pascal Le Bideau¹, Tahar Loulou¹

* ✉: lamiae.atmani@univ-ubs.fr

¹ Institut de Recherche Dupuy De Lôme

Mots clés : Transfert de chaleur, Conduction inverse, Régularisation spatiale, Mesures thermographiques

Résumé :

La mesure directe d'un flux de chaleur transmis à un milieu ou transitant par celui-ci est par nature intrusive et moyennée. Aussi, la mesure de la distribution spatiale et temporelle d'un champ de densités de flux s'avère particulièrement délicate voire impossible. Cet article vise à mettre en œuvre une procédure d'estimation basée sur un problème inverse de conduction thermique permettant de déterminer la répartition spatio-temporelle d'un flux de chaleur de forme gaussienne.

Une plaque plane de fer de faible épaisseur est sollicitée sur l'une de ces faces par un laser délivrant un flux de chaleur contrôlé en amplitude et distribué spatialement selon une fonction gaussienne 2D. Le champ de températures est mesuré sur la face opposée par thermographie infrarouge. La détermination des densités de flux de chaleur imposées se base sur la minimisation des écarts quadratiques obtenus entre les températures modélisées (modèle direct 3D) et mesurées. La procédure inverse retenue s'appuie sur la méthode séquentielle de spécification de fonction (SFSM) et permet l'estimation des densités de flux de chaleur imposées dans le temps et dans l'espace.

Pour garantir une application fiable de la SFSM aux problèmes multidimensionnels réels, cette étude s'appuie tout d'abord sur des expériences numériques proches du cas étudié. Les problèmes de conduction thermique inverses sont par nature mal-posés et nécessitent l'introduction d'une régularisation spatiale et/ou temporelle dans leur résolution. Cette étude vise à évaluer les limites de la méthode face au choix de la résolution spatiale (maillage de calcul, maillage d'estimation) et au choix du nombre de pas de temps futur. L'effet de l'amplitude du bruit de mesure sur la qualité de l'estimation est également étudié, ainsi que l'intérêt des techniques de régularisation.

Par la suite, la procédure est validée sur la configuration réelle pour laquelle la distribution des densités de flux appliquées est a priori connue.

Identification de la conductivité thermique d'un composite à matrice thermodurcissable en cours de réticulation

Rita Moussallem¹, Elissa El Rassy¹, Jean-Luc Bailleul¹

* ✉: rita.moussallem@univ-nantes.fr

¹ Nantes Université – UMR CNRS 6607 - Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes

Mots clés : Conductivité thermique, Méthode Inverse, Optimisation, Thermodurcissable, Réticulation

Résumé :

Les matériaux composites remplacent progressivement les alliages métalliques dans le domaine aéronautique afin d'alléger les structures tout en conservant, voire en améliorant, leurs propriétés mécaniques. Les procédés de mise en forme ont un impact essentiel sur les performances mécaniques des produits, d'où la nécessité d'optimiser les conditions de fabrication pour maîtriser les propriétés d'usage. Dans ce contexte, une connaissance précise de l'évolution des propriétés thermophysiques durant le changement de phase de la matière est cruciale pour modéliser de manière fiable les transferts thermiques.

Il est thermodynamiquement pertinent de modéliser l'évolution de la capacité thermique volumique en fonction de la température et du degré de transformation de la matière en utilisant une loi de mélange. Cependant, ce modèle ne convient pas pour la conductivité thermique, qui n'est pas une propriété extensive. L'objectif principal de ce travail de recherche est donc d'identifier l'évolution de la conductivité thermique au cours de la réticulation d'une résine époxy. Une méthode inverse est établie afin d'estimer cette évolution en fonction de deux champs couplés, sans imposer de loi de variation préalablement connue. Étant donné l'écart important entre les conductivités thermiques à l'état cru et à l'état cuit, la sensibilité de la température au cœur de la matière par rapport aux paramètres inconnus est suffisamment élevée pour résoudre le problème inverse. Le grand nombre d'inconnues est géré par un algorithme d'optimisation hybride, combinant une méthode stochastique avec une méthode déterministe. Un banc expérimental, conçu pour mesurer la réponse thermique du composite verre/époxy au cours de sa réticulation, est mis en place, et un modèle numérique robuste est développé pour reproduire l'application expérimentale. Les résultats sont par la suite comparés avec les lois de mélanges traditionnelles afin d'évaluer la validité de ces dernières.

Experiment-based Reduced Order Model by MIM applied to empty beehives for temperature prediction

Manuel Girault¹, Anna Duplex², Anne Lavalette², Delphine Jullien³, Emmanuel Ruffio²

* ✉: emmanuel.ruffio@alt-rd.com

¹ PPRIME - UPR3346

² CoActions-AltRD

³ LMGC – UMR 5508

Mots clés : instrumented beehives, reduced-order model, model identification, temperature prediction

Résumé :

Beekeepers are facing environmental challenges that threaten their profession. Many companies have developed wireless devices to help beekeepers to keep track of their colonies and to reduce unnecessary trips by monitoring the weight and the temperature of the hive in real time. Contrary to weight data, it's not clear yet what information can be retrieved from the temperature.

In this study, an algorithm to predict in-hive temperature is tested on empty beehives. This algorithm is based on a reduced order model (ROM) by the Modal Identification Method (MIM). The ROM equations are derived from local heat transfer equations and involve matrices that are unknown and have to be estimated by using an optimization algorithm. In this work, the MIM model learning phase is experiment-based, i.e. it relies only on temperature measurements provided by beehives equipped with several temperature sensors. The close environment of the hive is characterized using a set of sensors (temperature, irradiance, anemometer, etc.).

This kind of algorithm may be integrated in monitoring devices to send alert to the beekeeper before critical temperatures are reached in the hive. One key advantage of experiment-based models is to avoid having to specify hive geometry, material properties and boundary conditions (sun exposure, wind, air temperature, surrounding hives or trees or objects, type of ground...) which are all hive-specific and, for some of them, time-varying.

In this article, the temperature evolution for twelve days of an empty Dadant hive is presented and compared to the reduced order model outputs. The model is identified using the first eight days. The last three days are used for the comparison.

This work is a collaboration between PPRIME-UPR CNRS 3346 and CoActions-AltRD company whose research are funded by the European Better-B project (101081444-Better-B) in the frame of European Programme HORIZON-CL6-2022-BIODIV-02-two stage on resilient beekeeping (2023-2027).

Identification de la thermo-dépendance de la conductivité de matériaux isolants par modèles réduits modaux

Jianan Ni¹, Frédéric Joly¹, Yassine Rouizi¹, Olivier Quémener¹

* ✉: frederic.joly@univ-evry.fr

¹ LMEE, Univ. Evry Paris-Saclay

Mots clés : Identification; modèle réduit; non-linéarité

Résumé :

La connaissance de la conductivité des matériaux est essentielle en thermique. De nombreux dispositifs expérimentaux existent à cet effet (hot disk, fil chaud, méthode flash). Le système le plus intuitif reste encore la plaque chaude gardée, qui permet de remonter à la conductivité grâce à une simple mesure de différence de température et de flux de chaleur. Néanmoins, deux problématiques apparaissent :

- Lorsqu'il s'agit de mesurer la conductivité d'isolants, l'aspect unidimensionnel est difficile à assurer, et le dispositif expérimental est contraint : généralement la dimension parallèle au flux de chaleur est très petite devant les deux autres dimensions. S'affranchir d'une telle contrainte nécessite une modélisation tridimensionnelle complète du dispositif. Remonter à la conductivité à partir d'un tel modèle revient à résoudre un problème inverse chronophage.

- Lorsque la conductivité dépend de la température, la solution couramment adoptée est de mesurer la conductivité autour de plusieurs températures moyennes. La différence de température de part et d'autre du matériau doit être suffisamment faible pour que les effets de la thermo-dépendance soient négligeables durant un essai.

Nous proposons dans cette communication une méthode permettant de mesurer une loi de conductivité affine à partir d'un seul essai transitoire et pour une géométrie tridimensionnelle. Afin de diminuer drastiquement le temps de calcul inhérent à la problématique inverse appliquée à des modèles numériques maillés, des modèles réduits sont utilisés.

Cette étude purement numérique montrera l'influence du bruit de mesure sur la précision de la loi identifiée, et servira de preuve de concept pour un prototype expérimental.

Validation d'une instrumentation low-cost pour l'étude d'un générateur d'eau atmosphérique

Ando Ny Aina Randriantsoa¹, Diane Le Roux¹, Pierrot Ranjaranimaro², Thibaut Colinart¹

* ✉: thibaut.colinart@univ-ubs.fr

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

² Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, Iadiambola Ampasapito, BP 8122, Antananarivo 101, Madagascar

Mots clés : Condensation d'eau; IOT; Arduino; température; humidité relative; courant; capteur de niveau

Résumé :

À Madagascar, 50 % de la population n'a pas d'accès à l'eau potable et 64 % n'ont pas d'électricité en raison du manque d'infrastructure. Pour palier à ce problème, un générateur d'eau atmosphérique couplé à une installation photovoltaïque constitue une solution prometteuse pour produire de l'eau de façon autonome, en particulier dans des climats tropicaux humides. Pour valider la preuve de concept, une quantification in situ des performances reste nécessaire. Cependant, compte tenu de l'accès limité à l'électricité et en raison de contraintes économiques, une instrumentation low-cost doit être envisagée pour les mesurer.

Dans cette étude, un générateur d'eau atmosphérique a été doublement instrumenté, d'une part avec des capteurs low-cost connectés à des cartes ESP32 et Arduino (coût < 200 €) et d'autre part avec des capteurs de meilleure précision connectés à des centrales d'acquisition Keithley (coût > 6000 €). Cette instrumentation permet de mesurer les paramètres climatiques, la production d'eau et la consommation énergétique du générateur. Ces grandeurs ont été mesurées lors d'expériences réalisées dans une chambre climatique, sous des conditions statiques pour se confronter aux résultats de la littérature et sous des conditions dynamiques typiques de Madagascar pour évaluer le potentiel de production d'eau.

Pour les mesures de températures et d'humidité relative, les erreurs absolues maximales sont de 0,6 °C et 5 %rh respectivement et sont conformes aux précisions des capteurs. Les résultats montrent des erreurs absolues et relatives maximales de 0,09 A et 2 % pour la consommation électrique et de 0,08 kg et 7 % pour la production d'eau, validant ainsi l'instrumentation low-cost.

La perspective à ce travail consistera à court terme à valider une instrumentation low-cost d'une installation solaire photovoltaïque, lorsque celle-ci sera couplée au générateur d'eau atmosphérique et à moyen terme à tester le dispositif dans des conditions réelles de Madagascar.

Développement d'une méthode flash face avant pour l'étude thermique des dépôts de surface des composants en contact avec le plasma dans les tokamaks

Clément Monet-Vidonne¹, Jean-Laurent Gardarein¹, Jonathan Gaspar¹, Fabrice Rigollet¹

* ✉: clement.MONET-VIDONNE@univ-amu.fr

¹ Laboratoire IUSTI

Mots clés : Méthode flash rapide face avant ; Mesures Photothermiques ; Tokamak

Résumé :

Les recherches, visant à développer la fusion thermonucléaire comme nouvelle source d'énergie, utilisent des dispositifs expérimentaux appelés tokamaks. Dans ce type de machine, la matière (Isotopes de l'hydrogène) est confinée par des champs magnétiques pour être chauffée à haute température (plasmas). L'interaction du plasma avec les parois du tokamak génère des flux de particules et de chaleur importants pouvant atteindre 10MW/m² en régime permanent et parfois plus lors des phases transitoires. Dans ce contexte, le tokamak WEST (W Environment in Steady state Tokamak) est utilisé comme plateforme d'essai pour étudier l'interaction du plasma avec les composants face au plasma (CFP), en particulier ceux qui seront utilisés dans le tokamak international ITER.

Au cours des campagnes expérimentales WEST, diverses dégradations des CFPs ont été observées. L'une d'entre elles est l'érosion des matériaux et leur re-déposition sur d'autres composants. Ces dépôts ont des propriétés thermiques inconnues mais probablement dégradées (faible diffusivité et/ou faible contact thermique avec le CFP). Lors des récentes campagnes expérimentales, ces dépôts ont eu un impact majeur puisqu'ils se sont détachés des CFPs et sont entrés dans le cœur du plasma, entraînant la fin prématurée de la décharge.

L'objectif de cette étude est d'améliorer notre compréhension de l'évolution des propriétés thermiques des CFPs lors de leur utilisation dans le tokamak WEST. L'enjeu sera de développer des méthodes applicables directement sur un composant de type ITER (sans découpe ni modification) pour mesurer les propriétés thermiques des dépôts (diffusivité thermique, conductivité thermique, etc.). Comme ils sont minces (de l'ordre du μm à quelques dizaines de μm), une méthode flash en face avant est développée, avec une source de chaleur laser (10ns), pour identifier les paramètres par inversion des mesures photothermiques.

Thème 7

Thermique Atmosphérique et Adaptation au Changement Climatique

Assessing the Impact of Photovoltaic Systems on Urban Microclimate and Building Energy Demand	138
Résilience thermique dans les écoles – Revue bibliographique des solutions d'adaptation aux vagues de chaleur	139
Thermal Comfort Analysis and Occupant Adaptation in Office Buildings of Burkina Faso: A Field Study	140
Résilience aux vagues de chaleur d'un système de rafraîchissement adiabatique indirect destiné aux bâtiments tertiaires	141
Utilizing Local Climate Zone Data for Land Use Representation in Weather Research and Forecasting (WRF) Models	142
Numerical Simulation of Radiative Cooling Material Performance: BaSO ₄ /PVDF-HFP Composites Under Diverse Climatic Conditions	143
Inter-comparaison d'outils de simulation du microclimat urbain et confrontation à de la mesure . . .	144
Optimisation et valorisation des matériaux locaux de la région de Tiznit pour une meilleure performance thermique dans le cadre de l'Éco-construction	145
Impact de la nature des matériaux utilisés dans l'enveloppe des bâtiments, sur la consommation énergétique et le confort thermique en climat chaud et sec	146
Impact des variations saisonnières et du microclimat local sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur : Cas d'un bâtiment résidentiel à Nantes, France	147
Developing a model for Urban Environment based on transient RANS approach	148

Assessing the Impact of Photovoltaic Systems on Urban Microclimate and Building Energy Demand

Hamza Nisar¹, Christophe Ménézo², Mattheos Santamouris³

* ✉: christophe.menezo@univ-smb.fr

¹ LOCIE CNRS/USMB - UNSW

² LOCIE CNRS/USMB

³ University of New South Wales (UNSW)

Mots clés : WRF model; Photovoltaic; Solar Energy Integration; Urban Sustainability

Résumé :

Urbanization and the urban heat island (UHI) effect have led to a significant rise in electricity demand, necessitating innovative and sustainable energy solutions. Photovoltaic (PV) panels offer a promising alternative to meet these energy demands; however, their integration into urban environments can influence local thermal conditions and building energy dynamics. This study investigates the interaction between solar PV systems and the urban environment, focusing on their effects on microclimate variables and building energy demand.

The Weather Research and Forecasting (WRF) model, configured with a high spatial resolution of 0.3 km, was employed to simulate the thermal and energy impacts of PV systems in Lyon, France. The model incorporated advanced urban parameterizations, including building energy and surface-layer schemes, to capture detailed interactions. Scenarios with varying PV deployment levels were analyzed to assess changes in key meteorological variables and energy demand.

The results indicate that PV systems influence urban thermal conditions and energy consumption patterns. Specifically, PV panels affect surface temperatures and heat fluxes due to their shading and energy conversion properties. These changes, in turn, have implications for building energy use, demonstrating a complex interplay between renewable energy deployment and urban environmental factors.

In conclusion, the study highlights the dual role of PV systems as both a sustainable energy source and a moderator of urban thermal dynamics. The findings provide valuable insights for urban planners and policymakers to optimize PV deployment strategies that balance energy efficiency and environmental sustainability in urban areas.

Résilience thermique dans les écoles – Revue bibliographique des solutions d'adaptation aux vagues de chaleur

Mona Noroozi¹, Monika Woloszyn¹

* ✉: monika.woloszyn@univ-smb.fr

¹ Univ Savoie Mont Blanc, LOCIE

Mots clés : thermique, été, école, passif,

Résumé :

En France, les écoles et les 12 millions d'élèves et 854 000 d'enseignants sont confrontées à des enjeux thermiques particuliers et à un inconfort thermique lors des périodes académiques critiques. Par exemple, l'analyse récente de l'enquête de OQAI sur plus de 600 salles de classe montre les températures intérieures moyennes pouvant facilement attendre 26°C et les températures maximales les 32°C.

Les écoles sont particulièrement vulnérables à l'augmentation des températures en raison du jeune âge des occupants, des densités d'occupation élevées et des possibilités limitées d'ajustements comportementaux pour améliorer le confort thermique dans les salles de classe.

Le concept de résilience thermique pour les bâtiments non-résidentiels est un sujet qui connaît un fort développement récent. Les études de résilience thermique nécessitent, entre autres, une bonne intégration des techniques de rafraîchissement passives et actives, tout en tenant compte des incertitudes du climat futur (événements climatiques extrêmes).

Cet article présente une première étape de ce travail. Différentes stratégies de rafraîchissement passif utilisées dans les écoles et décrites dans la littérature scientifique seront analysées ici. Il s'agit par exemple des toitures végétalisées, façades et toitures à forte inertie thermique, rafraîchissement par évaporation, en complément des protections solaires, de la ventilation naturelle etc. Nous chercherons en particulier à évaluer l'adaptabilité des solutions à la rénovation thermique et au climat français.

Thermal Comfort Analysis and Occupant Adaptation in Office Buildings of Burkina Faso: A Field Study

Alphonse Bouda¹, Césaire Hema², Tizane Daho³, Adamah Messan²

* ✉: alphonsboud@gmail.com

¹ Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'environnement (2iE)

² Institut Internationale d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

³ Université Joseph Ki-ZERBO (UJKZ)

Mots clés : Thermal Comfort, Office Buildings, Thermal Sensation, Thermal Preference, Mixed-Mode.

Résumé :

Cette étude évalue le confort thermique dans les bâtiments de bureaux au Burkina Faso, en analysant les sensations et préférences des occupants. Les données recueillies montrent des variations influencées par l'architecture et les matériaux. Les bâtiments en blocs de terre comprimée offrent une meilleure stabilité thermique. L'utilisation de climatiseurs et de ventilateurs est une adaptation courante. Les résultats soulignent l'importance des matériaux et des conceptions adaptées au climat pour améliorer le confort thermique intérieur et orienter les rénovations.

This study examines thermal comfort in office buildings in Burkina Faso, focusing on occupants' sensations and preferences. Data collected through surveys and environmental measurements reveal variations influenced by architecture and materials. Compressed earth block buildings provide better comfort stability. Common adaptations include the use of air conditioners and fans. The findings highlight the importance of climate-responsive design and materials in enhancing indoor thermal comfort and guiding building improvements.

Résilience aux vagues de chaleur d'un système de rafraîchissement adiabatique indirect destiné aux bâtiments tertiaires

Antoine Breteau¹, Emmanuel Bozonnet², Patrick Salagnac², Jean-Marie Caous¹

* ✉: antoine.breteau@univ-lr.fr

¹ BLUETEK

² LaSIE (UMR CNRS 7356)

Mots clés : Rafraîchissement; adiabatique; confort thermique; résilience; changement climatique

Résumé :

Les systèmes de rafraîchissement adiabatique offrent une alternative intéressante aux systèmes de climatisation pour les bâtiments tertiaires, notamment en ce qui concerne l'impact environnemental. Cependant, leur efficacité et leur résilience face aux vagues de chaleur, dans un contexte de réchauffement climatique, varient selon la conception du système et la localisation.

Dans cet article, nous étudions le fonctionnement d'un système de rafraîchissement adiabatique indirect, souvent utilisé dans les bâtiments tertiaires équipés de centrale de traitement d'air. L'étude permet de mieux appréhender le fonctionnement de ce système et met en évidence les critères d'un dimensionnement optimal pour les climats chauds. Nous analysons en détail les caractéristiques spécifiques des différents modes de fonctionnement possible : free-cooling, mode double-flux, rafraîchissement adiabatique indirect ainsi que l'option d'un rafraîchissement adiabatique direct complémentaire.

Lors de cette étude, divers scénarios de vague de chaleur ont été identifiés en fonction des localisations, et le dimensionnement du système a été ajusté en conséquence. Plusieurs indicateurs liés aux seuils d'inconfort thermique, à la résilience, et à l'efficacité énergétique et hydrique ont alors été définis. Les résultats mettent en évidence des disparités marquées dans le fonctionnement du système. Dans les climats arides, l'utilisation combinée des modes adiabatiques direct et indirect est plus fréquente, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'eau. Par ailleurs, le coefficient de performance (COP) diminue dans les environnements extrêmement secs et humides, en raison d'un recours accru au fonctionnement du ventilateur et de la pompe à eau. Enfin, l'efficacité du système pour réduire l'inconfort thermique se révèle limitée dans les conditions climatiques extrêmes.

Utilizing Local Climate Zone Data for Land Use Representation in Weather Research and Forecasting (WRF) Models

Hamza Nisar¹, Christophe Ménézo¹, Mattheos Santamouris²

* ✉: Hamza.Nisar@etu.univ-savoie.fr

¹ Laboratoire LOCIE UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc – CNRS (France)

² UNSW Sydney

Mots clés : Urban Heat Island, Solar PV, WRF model

Résumé :

Local Climate Zones (LCZs) classify urban areas based on their morphology and thermal properties. Using the WUDAPT Level 0 methodology, this study develops an LCZ map for Lyon by leveraging satellite imagery and open-source tools. The process involves collecting training data, performing classification, and validating results. The LCZ map reveals Lyon's diverse urban structures, offering valuable insights for climate studies and sustainable urban planning. This study highlights the utility of LCZ datasets in addressing challenges posed by urbanization and climate change.

Numerical Simulation of Radiative Cooling Material Performance: BaSO₄/PVDF-HFP Composites Under Diverse Climatic Conditions

Hiba Mhiri¹, Anna Lushnikova¹, Christophe Menezo¹

* ✉: hiba.mhiri@univ-savoie.fr

¹ Laboratoire LOCIE UMR 5271, Solar Academy Graduate School – Univ. Savoie Mont Blanc - CNRS

Mots clés : Passive cooling technologies, numerical simulation, multi-scale modeling, Climate adaptability, BaSO₄ nanoparticles, Solar radiation.

Résumé :

The growing need for sustainable and energy-efficient cooling solutions has driven the exploration of innovative materials for passive radiative cooling, particularly in mitigating urban heat island effects. This study presents a comprehensive multi-scale numerical simulation of BaSO₄/PVDF-HFP polymeric composites, designed to enhance radiative cooling performance across diverse climatic conditions. BaSO₄ is chosen for its exceptional solar reflectance and infrared emissivity, properties that reduce solar absorption and maximize thermal radiation emission.

A multi-scale approach is adopted to analyze the thermal and optical properties of these composites, integrating advanced modeling techniques and experimental validations across scales from nanoscale to mesoscale. Molecular dynamics simulations reveal that BaSO₄ dispersion improves key thermal properties, such as thermal conductivity and heat capacity, while COMSOL Multiphysics simulations show how nanoscale textures and surface structures enhance optical behaviors like reflectance and emissivity.

The results highlight the potential of BaSO₄/PVDF-HFP composites to achieve sub-ambient cooling, with optimized surface structures improving solar reflectance and thermal emission. Simulations and experimental comparisons demonstrate significant cooling efficiencies under varying climatic conditions, including hot and humid environments. Notably, tailoring surface roughness and BaSO₄ distribution within the matrix enhances cooling performance, making these materials adaptable to diverse climates.

These findings reveal the potential of tailored particle dispersion and surface structuring to achieve sub-ambient cooling performance, even in challenging climates.

This work contributes to the development of next-generation materials for solar energy systems, thermal barrier coatings, and passive cooling technologies. It establishes a predictive framework for designing scalable, high-performance coatings adaptable to diverse

Inter-comparaison d'outils de simulation du microclimat urbain et confrontation à de la mesure

Marie-Hélène Azam¹, Hugo Matry², Chaimaa Delasse¹, Auline Rodler³, Matthieu Labat², Marion Bonhomme², Stéphane Ginestet², Pierre Kastendeuch⁴, Marjorie Musy³

* ✉: marie-helene.azam@insa-strasbourg.fr

¹ Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357

² Université de Toulouse, INSA de Toulouse, LMDC, UPS

³ CEREMA BPE

⁴ Université de Strasbourg, CNRS, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Laboratoire ICube UMR 7357

Mots clés : Microclimat urbain, benchmark, rue canyon, simulation

Résumé :

Plusieurs outils de simulation microclimatique ont été développés afin de quantifier l'impact de solutions constructives et d'aménagements, telles que la végétalisation ou la modification des revêtements, sur le microclimat urbain et le confort extérieur des piétons. Face à la complexité du problème à résoudre (bilan radiatif, transferts de chaleur et de masse dans chaque surface, bilan aéraulique et anthropique) et aux capacités de calcul actuelles, chaque outil propose des approches différentes. Le niveau de détail de la représentation des phénomènes physiques, les méthodes de résolution et l'architecture varient d'un outil à l'autre. Ce papier propose donc de comparer les résultats fournis par trois outils de simulation : SOLENE-Microclimat, LASER/F et COMSOL Multiphysics sur un même cas d'étude, une géométrie simple de rue canyon exposée à des conditions climatiques réalistes. Le choix s'est porté sur la plateforme expérimentale ClimaBat située à La Rochelle. Cette plateforme est composée de plusieurs bâtiments à échelle réduite formant trois rues canyons de rapport d'aspect 1/1. Elle fournit un jeu de données de mesures permettant de confronter les modèles : données météorologiques du site, températures de surface des différentes parois et température de l'air. Après une brève présentation des différents modèles, les résultats des simulations sont comparés aux mesures in situ. Enfin, les avantages et limites de chacun des modèles sont analysés et discutés.

Optimisation et valorisation des matériaux locaux de la région de Tiznit pour une meilleure performance thermique dans le cadre de l'Éco-construction

Said Bajji¹, Ahmed Saba¹, Youssef Naimi²

* ✉: bsaidfssm@gmail.com

¹ université IBN ZOHR Agadir, Maroc

² Université BEN MSIK Casablanca

Mots clés : Matériau de construction écologique; Argile; déchets de poterie; Cendre de bois; Caractérisations thermophysiques.

Résumé :

L'utilisation de matériaux de construction tels que l'argile revêt un intérêt considérable, notamment en raison de leur disponibilité locale et de leurs avantages écologiques. Cependant, avec la montée de l'urbanisation et de l'occidentalisation, les constructions à base de matériaux importés, principalement du ciment, sont devenues plus courantes, entraînant des coûts élevés de construction et une consommation importante d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Face aux défis énergétiques mondiaux et à la crise environnementale croissante, l'éco-construction suscite un intérêt accru en raison de ses avantages environnementaux. Au Maroc, notamment dans des régions comme le village de "Tighmi", les artisans continuent à utiliser des matériaux locaux pour la construction. De plus, une tendance émerge où un nombre croissant de personnes, souvent plus aisées, montrent un intérêt pour la construction écologique en utilisant des matériaux comme l'argile, la terre et le bois.

Dans ce contexte, le recyclage des déchets de construction offre une solution non seulement aux problèmes environnementaux liés à la gestion des déchets, mais également à l'amélioration des performances des matériaux de construction. Cette étude se concentre particulièrement sur l'utilisation de cendres de bois et de déchets de poterie broyés dans la fabrication de briques respectueuses de l'environnement.

Des expériences ont été menées à l'échelle du laboratoire pour déterminer les proportions optimales de ces déchets dans les mélanges de terre, visant à obtenir des caractéristiques thermiques optimales pour les briques. Les résultats ont montré que l'incorporation de 30 % de cendres de bois et jusqu'à 20 % de déchets de poterie broyés améliorerait les propriétés thermiques des briques tout en contribuant à la gestion des déchets. Ces mélanges ont permis de produire des blocs écologiques présentant une résistance thermique comparable à celle des matériaux traditionnels.

Impact de la nature des matériaux utilisés dans l'enveloppe des bâtiments, sur la consommation énergétique et le confort thermique en climat chaud et sec

Césaire Hema¹

* ✉: cesaire.hema@2ie-edu.org

¹ Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Mots clés : Climat chaud ; Confort thermique ; Consommation énergétique ; Habitat durable.

Résumé :

Pour assurer des conditions climatiques confortables à l'intérieur des bâtiments au Burkina Faso, il est courant de recourir à la climatisation. Or, la nature des matériaux de construction utilisés a un impact sur les températures intérieures et la consommation d'énergie pour le refroidissement. La présente étude examine l'impact de la nature des matériaux des murs extérieurs des bâtiments sur les températures intérieures et la consommation d'énergie pour le refroidissement au Burkina Faso. Ainsi, trois bâtiments en tout point identiques, à l'exception des matériaux des murs, ont été instrumentés simultanément avec des capteurs pour suivre l'évolution des températures et des compteurs d'énergie pour évaluer la consommation énergétique liée au refroidissement. Les trois types de murs extérieurs sont réalisés à base de parpaings en ciment, de briques de terre comprimée stabilisée au ciment (BT_{Cc}) et de briques de terre comprimée stabilisée au géopolymère (BT_{Cg}). Les résultats préliminaires montrent que le bâtiment dont les murs sont en parpaings de ciment présente des températures intérieures plus basses que celui en briques de terre comprimée stabilisée au ciment (BT_{Cc}), ainsi que celui en briques de terre comprimée stabilisée au géopolymère (BT_{Cg}). En ce qui concerne la consommation énergétique pour le refroidissement, les écarts observés sont minimes et variables.

Impact des variations saisonnières et du microclimat local sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur : Cas d'un bâtiment résidentiel à Nantes, France

Manal Ach-Chakhar¹, Sihem Guernouti², Adnane M'Saouri El Bat³, Zaid Romani⁴, Abdeslam Draoui⁵

* ✉: manal.achchakhar@gmail.com

¹ Cerema, Equipe de Recherche BPE, Nantes, France et Materials, Systems and Energy Engineering Laboratory (MaSEEL) - UAE/U04FSTTg, Tanger, Maroc

² Cerema, Equipe de Recherche BPE, Nantes, France.

³ WINK PANDO2, 46 – 48 Rue René Clair, 75018 Paris, France

⁴ Research Laboratory of Built Environment and Landscape (LaBEL), National School of Architecture, Tetouan, Morocco

⁵ Materials, Systems and Energy Engineering Laboratory (MaSEEL) - UAE/U04FSTTg - Faculty of Sciences and Techniques of Tangier, Morocco

Mots clés : Microclimat; Confort thermique; particules fines; CO₂; Balance Point Concentration; bâtiment résidentiel; mesures;

Résumé :

La qualité de l'air intérieur et le confort thermique sont des enjeux majeurs pour la santé et le bien-être des occupants, et ce dans un contexte de changement climatique où le microclimat local et les variations saisonnières influencent les performances des bâtiments notamment résidentiels. L'étude proposée ici vise à étudier les interactions entre les conditions climatiques extérieures, les concentrations de particules fines (PM10, PM2.5, PM1) et de CO₂ et le confort thermique et la qualité de l'air intérieur dans un logement situé à Nantes.

Des données expérimentales ont été collectées sur une année pour mesurer les concentrations de CO₂ et de particules fines, en lien avec les paramètres météorologiques locaux. L'analyse montre que les conditions saisonnières modifient la dynamique des échanges air intérieur/extérieur : en été, une ventilation naturelle accrue améliore la dilution du CO₂ et le confort thermique, mais favorise l'infiltration des particules extérieures. En hiver, les infiltrations dues aux gradients de pression augmentent les concentrations intérieures de polluants, tandis qu'une ventilation insuffisante exacerbe les niveaux de CO₂, compromettant le confort et la qualité de l'air.

Pour quantifier les performances du bâtiment, un indicateur inspiré du concept Balance Point Concentration (BPC) a été adapté au contexte résidentiel. Cet indicateur évalue la capacité d'un bâtiment à maintenir une qualité de l'air intérieur acceptable malgré les fluctuations extérieures et les émissions internes. Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier les compromis entre confort thermique et qualité de l'air intérieur selon les saisons, et de proposer des recommandations pratiques : amélioration de l'étanchéité à l'air et gestion des systèmes de ventilation en hiver, et limitation des infiltrations de particules en été tout en optimisant l'aération.

Developing a model for Urban Environment based on transient RANS approach

Hamidreza Mohammadpour¹, Stephanie Giroux-Julien¹, Victoria Timchenko², Auline Rodler³, Eric Peyrol¹

* ✉: hamidreza.mohammadpour@univ-lyon1.fr

¹ LAGEPP- Université Claude Bernard Lyon 1

² University of New South Wales

³ CEREMA

Mots clés : Urban Environment, Numerical simulation, RANS model, Heat and Momentum Transfer

Résumé :

The ambient air temperature in a city is a critical parameter for thermal comfort. It also strongly influences energy needs for cooling and heating. As such, it is necessary to work on solutions to limit the effects of urban heat islands. Building and street surfaces cover a big fraction of the city surfaces. Thermal and radiative parameters of these surfaces can affect urban ambient air temperature and street canyon temperature. So, using specially designed pavements on buildings and surfaces on the streets can be an effective way to mitigate the urban heating. In this study, using fluid flow and heat transfer simulations, the thermal effect of cool pavements and street surfaces on the urban environment is studied. Finite Volume solver in ANSYS/FLUENT 22. software is used to solve unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes (URANS) equations. Realistic solar load is applied using solar ray tracing model to simulate the radiation of the sun. The aim of this paper is to describe the developed model and to show the accuracy of the result by comparing them to real data that have been published from data gathering campaigns. Also, results are compared with other models to measure the accuracy of this model against others.

Thème 8

Thermique appliquée

Experimental and numerical analysis of shower drain water heat recovery heat exchangers fouling .	151
Recyclage par Reformage de Composites à Matrice Polyester	152
Performances hygrothermiques d'un composite en plâtre et fibres de Furcraea Foetida (choca vert)	153
Caractérisation thermomécanique de matrices latérites renforcés avec le typha pour l'isolation dans l'habitat	154
Influence des transferts d'humidité sur la transmittance thermique de murs en ossature bois	155
Experimental study to assess the effect of coatings radiative properties on the temperature of a Dadant hive	156
Dispositif de mesure de couches parasites par dissipation thermique et mesure de résistance thermique	157
Etude des propriétés physico-chimiques de composites biodégradables PLA/fibres naturelles destinés à une application bâtiment	158
Essais dynamiques pour caractériser le comportement thermique des murs - Application au béton de terre	159
Valorisation des déchets d'éléments d'ameublement (DEA) dans l'isolation thermique des bâtiments : Caractérisation thermophysique et analyse de cycle de vie	160
Analyse in-situ de la résistance thermique de parois d'une construction en terre crue	161
Caractérisation et simulation du comportement thermique d'éco matériau composite à base de terre de barre et fibre de coco.	162
Analyse de l'efficacité du type et du mode de fonctionnement de protections solaires mobiles sur un logement individuel à partir de simulations thermiques dynamiques	163
Caractérisation de la qualité de l'interface thermosoudée entre deux composites thermoplastiques .	164
Effect of front and side confinement on a vertical heated plate with two-phase cooling	165
Évaluation du potentiel des stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie : comparaison entre les méthodes psychrométriques et la modélisation dynamique	166
Optimisation du dimensionnement d'un condenseur à ailettes creuses interconnectées en polymère	167
Experimental and numerical study of constrained melting of metallic phase change material (PCM) .	168
Contrôle des conditions de mise en forme d'une pièce composite à matrice thermodurcissable de très forte épaisseur	169
Etude numérique de dimensionnement et d'optimisation d'un caloduc spatial innovant	170
In-hive temperature evolution: comparison between measurements and simulations	171
Impression 3D de structures en carbone ouvertes pour la production de vapeur d'eau par distillation solaire	172

Développement d'un composite MCP à base de cire d'abeille pour une gestion thermique optimale des piles à combustible PEMFC	173
Optimisation de la conception des parois du bâtiment pour la réduction des consommations énergétique	174
Modèle saisonnier de pont thermique	175
Development and Optimization of Electrically Resistant Paint for Road De-Icing: A Numerical and Experimental Study	176
Air-based sensible thermocline thermal energy storage numerical modelling and optimization over a charge-standby-discharge cycle	177
étude numérique du refroidissement par immersion d'un pack de batterie lithium-ion	178
Développement et caractérisation thermophysique de bio composite d'isolation à base de fibres de coir et gaines foliaires de cocotiers.	179
Vegetable oils as heat transfer fluids: literature review and thermal aging study under inert atmosphere	180
Optimisation thermique de la capture du CO ₂ par des composites MOF-graphite: approches expérimentales et modélisation thermique	181
Optimisation des propriétés thermiques, mécaniques et rhéologiques d'un mortier contenant du matériau à changement de phase	182
Caractériser la performance du rafraichissement hybride dans un bâtiment de bureaux : focus sur le confort thermique	183
Vers la Modélisation multiphysique de la fusion par laser d'un analogue de Régolithe lunaire : Caractérisations Thermo-optiques	184
Thermal-hydraulic conditions at and downstream of a quench front during a Loss-of-Coolant Accident in a Pressurized Water Reactor	185

Experimental and numerical analysis of shower drain water heat recovery heat exchangers fouling

Jean-Baptiste Bouvenot¹

* ✉: jean-baptiste.bouvenot@insa-strasbourg.fr

¹ INSA Strasbourg/ICube Laboratory

Mots clés : DHW; grey water; drain water; waste heat; shower; fouling

Résumé :

Heat recovery from grey water is an interesting strategy that can drastically reduce energy consumption for DHW. However, these exchangers contain warm water on the hot side that is contaminated (grease, organic matter) and in contact with oxygen, which encourages the development of biofilm. This biofilm has a potentially significant impact on the performance of these exchangers. The aim of this study is to analyse one year's experimental data and to derive an analytical data driven model simulating biofilm development and contact resistance for use in calculation codes.

Recyclage par Reformage de Composites à Matrice Polyester

Mohammad Jawad Berro¹, Juliana Preisner¹, Eric Le Gal La Salle¹, Jean-Luc Bailleul¹

★ ✉: mohammad-jawad.berro@etu.univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes

Mots clés : Composites thermodurcissables, recyclage, reformage

Résumé :

Les matériaux composites sont réputés pour leurs propriétés remarquables en termes de légèreté, de rigidité et de résistance. Aujourd'hui, ils sont utilisés dans de nombreux domaines de l'industrie, notamment les véhicules de production, les équipements sportifs, les avions, les éoliennes, les bateaux de plaisance et bien d'autres encore. Une bonne indication du développement rapide du marché mondial des composites est que sa valeur atteindra 160 milliards de dollars d'ici 2027. Cependant, leur utilisation excessive produit de grandes quantités de déchets qui peuvent être classés dans la catégorie des déchets de production ou de fin de vie. Par exemple, avec l'augmentation rapide de la valeur du marché, 43 millions de tonnes de déchets de pales d'éoliennes seront produites d'ici 2050. Les protocoles de recyclage disponibles, tels que le recyclage mécanique, thermique et chimique, sont donc mis à l'épreuve. Bien qu'elles soient bien établies, elles présentent encore un certain nombre d'inconvénients, tels que la perte de propriétés et de matériaux dans le produit final, ainsi que des problèmes de coût et de sécurité. Des méthodes innovantes et rentables sont en cours d'élaboration afin de mettre en place des filières de recyclage plus efficaces. Dans le cadre du projet européen RECREATE, qui vise à améliorer l'économie circulaire des composites, ce travail présente une méthode de recyclage originale, le reformage. Principalement axée sur les composites issus des éoliennes et des coques de bateaux, cette méthode consiste à transformer la géométrie d'une pièce courbe en une pièce plate, qui peut ensuite être utilisée pour fabriquer des tables ou des panneaux pour les transports en commun... L'étude comprend la caractérisation des matériaux afin de déterminer les limites mécaniques et thermiques, et de définir les conditions optimales de fonctionnement. Elle comprend également des essais sur site, les connaissances acquises étant directement appliquées.

Performances hygrothermiques d'un composite en plâtre et fibres de *Furcraea Foetida* (choca vert)

Hélène Caillet¹, Laurent Ibos², Nicolas Dujardin², Chadi Maalouf³, Christophe Bliard⁴, Lénéa Malherbe⁵, Julie Bascaules⁶, Laetitia Adelard⁵, Olivier Marc⁵

✉: helene.caillet@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire PIMENT, IUT Saint-Pierre

² Université Paris Est Créteil, CERTES, OSU Efluve

³ ITheMM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, Campus du Moulin de la Housse -Université de Reims Champagne Ardenne

⁴ Institut de Chimie Moléculaire de Reims (ICMR-UMR 7312 CNRS), UFR Sciences Exactes et Naturelles

⁵ Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT)

⁶ Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT), ADEME, Agence de la transition écologique

Mots clés : Fibres végétales ; *Furcraea Foetida* ; plâtre ; isolant ; conductivité thermique

Résumé :

Le *Furcraea Foetida*, aussi connu sous le nom de choca vert, est une espèce envahissante présente sur le territoire de La Réunion. Cette plante a été initialement importée sur l'île pour la fabrication de cordage en raison de caractéristiques mécaniques de ses fibres. Aujourd'hui, le choca vert est inexploité et représente une menace pour la flore locale. Les premiers travaux menés sur l'évaluation de la conductivité thermique des fibres de choca en vrac ont montré des propriétés intéressantes en tant qu'isolant thermique. En tant que territoire insulaire, La Réunion rencontre des problématiques majeures en matière de gestion et de traitement des déchets, ainsi qu'une forte dépendance aux importations, notamment dans le domaine de la construction. Chaque année, 4 000 tonnes de déchets de plâtre sont produites à La Réunion, dont 2 500 tonnes valorisées localement par la société STS (tri et broyage). La poudre fine obtenue est non valorisée sur le territoire. Dans le cadre de cette étude, des matériaux ont été formulés à partir des fibres de choca et de plâtre industriel, avec l'objectif de formuler des matériaux en plâtre recyclé et fibres de choca ultérieurement. Les fibres de choca sont extraites manuellement, puis coupées en tronçons de 3 cm. La poudre de plâtre, préalablement tamisée, est chauffée pour éliminer son eau cristalline, transformant ainsi le gypse en hémihydrate de calcium, ou bassanite. Cinq échantillons de dimensions 27x27x4 cm ont été fabriqués : un échantillon en plâtre seul avec un rapport eau/plâtre de 0,6, un échantillon contenant des fibres en vrac avec une densité de 0,035, et trois échantillons composites de plâtre et fibres, avec des pourcentages massiques de fibres de 0,33 %, 0,59 % et 1 % respectivement. Les propriétés thermiques des échantillons sont ensuite étudiées avec la réalisation des isothermes de sorption/désorption et la mesure de la conductivité thermique avec la méthode Hot-Disk.

Caractérisation thermomécanique de matrices latérites renforcés avec le typha pour l'isolation dans l'habitat

El Hadji Abdoul Aziz Cisse¹, Papa Touty Traore²

* ✉: elhadjiabdoulazizcisse1@gmail.com

¹ Université Cheikh Anta Diop de Dakar

² Université cheikh Anta Diop de Dakar

Mots clés : Caractérisation, plan chaud asymétrique, conductivité, effusivité, traction, compression, presse et masse volumique

Résumé :

Chaque personne, dans chaque pays et sur chaque continent sera touchée d'une manière ou d'une autre par les changements climatiques. Un cataclysme climatique se profile à l'horizon dû aux émissions de gaz à effet serre. Ce qui explique une demande forte en climatisation dans les années à venir d'où la nécessité d'une bonne isolation thermique à moindre coût. Mais aussi, une politique de prévention, d'adaptation et de résilience est nécessaire pour la protection de l'environnementale à l'avenir. Ce présent article a pour objectif de répondre aux ODD 7, 11 et 13 des nations unies. Par conséquent, ce résumé présente des résultats de caractérisations thermomécanique de l'additif du typha (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) dans les matrices latérites. D'abord, nous avons fait une caractérisation thermique par la méthode du plan chaud asymétrique conduisant à une conductivité et une effusivité thermiques dans les proportions différentes. Ensuite, des tests mécaniques ont été réalisés afin de déterminer la traction et la compression de chaque matériau avec une presse matest. Ceux qui ont permis d'obtenir comme résultats selon le pourcentage, pour les tests thermiques : une conductivité variant entre 0,7178W/m.K à 0,0597W/m.K et une effusivité variante entre 942,5392 J/m².K.s^{1/2} à 287,0855 J/m².K.s^{1/2} et pour les tests mécaniques : une traction variant entre 0,035MPa à 0,034MPa et une compression variant entre 0,1115MPa à 0,0805MPa pour les différentes échantillons. L'exploitation des résultats nous a permis d'étudier la conductivité, l'effusivité, la traction et la compression en fonction de leurs masses volumiques.

Influence des transferts d'humidité sur la transmittance thermique de murs en ossature bois

Machhour El Assaad¹, Yohan Plantec², Thibaut Colinart¹, Thibaut Lecompte¹

* ✉: thibaut.colinart@univ-ubs.fr

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

² Cellaouate, 29600 Saint Martin des Champs, France

Mots clés : transferts hygrothermiques ; transmittance thermique ; méthode fluxmétrique ; terre allégée

Résumé :

Comprendre l'impact de l'humidité sur les transferts thermiques dans les parois est essentiel pour garantir la performance énergétique des bâtiments. Cependant, les études concernant les effets de l'humidité sur les mesures in situ de transmittance thermique (coefficient U) sont rares dans la littérature et ne prennent en compte que l'augmentation du coefficient U résultant de l'augmentation de la teneur en humidité. Toutefois, la situation est plus complexe, car l'humidité peut avoir des effets supplémentaires sur les mesures, notamment en surface via des transferts latents d'énergie.

Ce travail se focalise sur l'influence du transfert d'humidité sur le coefficient U de murs à ossature bois en combinant des analyses expérimentales et numériques. Six systèmes distincts de murs à ossature bois sont étudiés dans une enceinte bi-climatique, chacun présentant des matériaux d'isolation et des couches de finition différents. Le protocole expérimental consiste à maintenir un gradient de température contrôlé tout en faisant varier la direction et l'ampleur du gradient de pression de vapeur, ce qui permet d'étudier l'interaction entre le flux d'humidité et le flux de chaleur. Une analyse numérique des transferts hygrothermiques de cette expérience est également proposée.

Les résultats numériques soulignent que le coefficient U doit diminuer lorsque le flux d'humidité s'oppose au flux de chaleur (et réciproquement). Cette observation est d'autant plus marquée que les murs possèdent une perméabilité à la vapeur élevée. En revanche, lorsque le coefficient U est mesuré selon la méthode fluxmétrique (HFM), le fluxmètre modifie localement le transfert d'humidité, conduisant à un biais dans la mesure.

Experimental study to assess the effect of coatings radiative properties on the temperature of a Dadant hive

Anna Dupleix¹, Olivier Rozembaum², Anne Lavalette¹, Lionel Cosson², Delphine Jullien³, Emmanuel Ruffio¹

* ✉: emmanuel.ruffio@alt-rd.com

¹ CoActions-AltRD

² CEMHTI - UPR3079 CNRS

³ LMGC – UMR 5508

Mots clés : beehive, sun radiation, coatings, radiative properties

Résumé :

The temperature in a beehive is the result of a thermal balance between the colony thermoregulation activity and daily weather variations. Beehives exchange energy via (1) outside air convection (2) solar radiation and (3) infrared radiation with surrounding objects. In summer, the sun radiation may be strong enough to alter the colony activities and could even soften the wax leading to a collapse of the honeycombs.

To help beekeepers to mitigate sun radiation, especially for beehives that are exposed to direct sunlight, this experimental study investigates the effect of coatings (paints) on the internal temperature of a Dadant hive. Two empty hives are instrumented using several temperature sensors and a local weather station monitors the immediate environment. The results show a significant reduction in temperature when the hive's roof is painted white (-27°C on peak for the roof and -2.5°C on daily-average for the hive body) compared to the steel roof. Conversely, this steel roof (new or oxidized) is roughly equivalent to one painted black. The effect of coatings on the side walls is more marginal with a maximum temperature change of few degrees.

To better understand these results, spectral emissivity measurements of these coatings between 0.4 to 20µm wavelength are presented. They were carried out in CEMHTI laboratory using two integrating spheres. A closed-form equation is derived from steady state equation to provide the temperature change with respect to coating emissivities ϵ_{sun} and ϵ_{ir} , respectively in the visible and infrared ranges. As predicted by the equation and confirmed by measurements, a black painted roof and a steel roof are very close in term of temperature.

This work is a collaboration between CEMHTI -UPR CNRS 3079 and CoActions-AltRD company whose research are funded by the European Better-B project (101081444-Better-B) in the frame of European Programme HORIZON-CL6-2022-BIODIV-02-two stage on resilient beekeeping (2023-2027).

Dispositif de mesure de couches parasites par dissipation thermique et mesure de résistance thermique

Nathan Richermoz¹, Quynh Trang Pham¹, Zoé Anxionnaz-Minvielle¹, Guillaume Delaplace²

* ✉: nathan.richermoz@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, France

² Univ. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille Institut, UMR 8207 - UMET, France

Mots clés : Optimisation énergétique ; procédés de rupture ; économies d'énergie ; encrassement ; détection ; résistance thermique ; échangeurs ; efficacité énergétique

Résumé :

L'encrassement est le phénomène de dépôt indésirable d'un matériau sur une paroi. Dans les processus industriels avec transport de fluide et/ou transfert de chaleur, l'encrassement est responsable de pertes d'efficacité aussi bien thermique, qu'hydraulique. Actuellement les procédures de nettoyage sont donc effectuées selon une approche conservatrice.

La procédure de mesure consiste à utiliser les propriétés thermorésistives du Nickel pour :

- Dissiper une puissance électrique via un courant électrique constant
- Mesurer la valeur de résistance électrique correspondante

Pour une mesure, plusieurs paliers de courant sont analysés et la pente en résistance électrique/puissance électrique est suivie dans le temps. Plus l'épaisseur de la couche de dépôt est importante plus la valeur de cette pente l'est également.

La boucle expérimentale utilisée contient un bain intégrant une régulation en température (0-90°C) et une pompe (6-20 L/min), un débitmètre, un capteur de pression différentielle et des thermocouples. La sonde est fixée sur une manchette interchangeable. Le fluide de travail est un mélange d'eau et de glycérol ajusté pour atteindre des régimes de turbulence variés. Plusieurs tubes d'épaisseur et de propriétés thermiques connues sont introduits dans la manchette pour reproduire et maîtriser un dépôt de couche parasite.

Une modélisation à l'aide du logiciel Fluent est effectuée sur un domaine plan axisymétrique intégrant un modèle de turbulence et considérant les pertes axiales et par convection avec l'environnement ambiant. Les méthodes inverses sont employées pour reproduire les résultats expérimentaux en faisant varier les conditions thermo-hydrauliques et les tubes présents dans la manchette.

Conclusion

Une approche combinée numérique-expérimentale est employée pour interpréter des signaux d'une sonde d'encrassement basée sur le principe de thermorésistance et de mesure de la résistance thermique d'une couche parasite.

Etude des propriétés physico-chimiques de composites biodégradables PLA/fibres naturelles destinés à une application bâtiment

Nadia Kharchi¹, Magali Fois², Brahim Barka³, Farid Rouabah⁴

* ✉: fois@u-pec.fr

¹ laboratoire physico-chimique des hauts polymères, Université Ferhat Abbas-Setif-1

² UPE, CERTES,

³ Unité de Recherche des Matériaux Émergents

⁴ laboratoire physico-chimique des hauts polymères, Université Ferhat Abbas-Setif-1,

Mots clés : isolant à base de fibres naturelles, composites à matrice polymère, analyse thermique

Résumé :

L'association de fibres végétales et de polymères pour créer des isolants dans le bâtiment est une solution innovante et durable. Une grande diversité de fibres naturelles est déjà utilisée (lin, chanvre, bois, sisal, coco, etc...) et le choix des polymères reste assez vaste. En dehors de l'intérêt du mélange polymère/ fibres naturelles pour leurs propriétés isolantes, acoustiques et régulation de l'humidité, l'incorporation des fibres végétales dans des polymères rend ces matériaux partiellement biodégradables. Le choix d'un polymère biodégradable peut être une solution plus performante pour résoudre les problématiques de recyclage. Dans les composites à base de polymères, il est souvent nécessaire d'effectuer un traitement des fibres pour améliorer l'adhésion fibre/matrice. Dans ces travaux des composites ont été obtenus en mélangeant un polymère biodégradable (PLA) et des fibres extraites d'herbe de pampa (*Ampelodesmos mauritanicas*) très courantes dans le pourtour méditerranéen.

Des fibres issues ont été extraites après rouissage puis traitées. L'IRTF a permis d'étudier les mécanismes de modification qui surviennent sur des fibres lors du traitement. Une observation au MEB des fibres et des faciès de rupture des composites a permis de voir l'influence du traitement chimique sur la morphologie des fibres et sur l'adhésion fibre/matrice. L'analyse thermique différentielle a permis quant à elle de connaître les températures de dégradation des fibres et des composites. L'étude en DSC a montré que le PLA cristallise en présence des fibres ce qui a été confirmé par l'étude en Analyse Mécanique Dynamique. Une légère amélioration de l'adhésion fibre matrice a été mise en évidence grâce à la DMA. L'ajout des fibres a conduit à des matériaux apparemment plus denses que le polymère seul. Cette évolution de la densité peut avoir des conséquences sur la conductivité thermique des composites.

Essais dynamiques pour caractériser le comportement thermique des murs - Application au béton de terre

Manon Rendu¹, Patrick Salagnac²

* ✉: patrick.salagnac@univ-lr.fr

¹ Plateforme Tipee

² LaSIE - La Rochelle université

Mots clés : Caractérisation, Béton de terre, Façade, Boite chaude gardée, Expérimentation

Résumé :

Au stade de la conception, la connaissance des propriétés intrinsèques des matériaux est l'une des premières données nécessaires pour estimer la consommation d'énergie. Certaines propriétés peuvent être mesurées en laboratoire sur de petits échantillons, dans des conditions de température et d'humidité très contraignantes. Dans tous les cas, ces mesures ne prennent jamais en compte la composition réelle d'un mur et les aléas de la construction d'un bâtiment en grandeur réelle.

Les mesures dans un équipement de type Boîte Chaude Gardée (BCG) permettent de les prendre en compte. La BC est un système expérimental composé de deux chambres climatiques dont la température et l'humidité relative sont contrôlées. Les BCG sont idéalement adaptés à des échantillons de grande taille, plus représentatifs de l'échelle du bâtiment. Il est alors possible d'étudier des assemblages de matériaux réels dans des conditions similaires aux conditions in situ.

Dans ce travail, nous présentons un protocole expérimental récemment développé pour contrôler le comportement thermique dynamique d'un nouveau matériau, ce qui nous permet de mesurer ses propriétés/caractéristiques thermiques (résistance thermique, capacité thermique) dans des conditions expérimentales réalistes. Le matériau étudié est un nouveau béton composé principalement de terre excavée, encastré dans une structure en bois. Ce matériau hygroscopique a une capacité thermique élevée.

Valorisation des déchets d'éléments d'ameublement (DEA) dans l'isolation thermique des bâtiments : Caractérisation thermophysique et analyse de cycle de vie

Laurice El Khoury¹, Ons Hamdaoui¹, Hamza Allam², Marie-Lise Pannier³, Laurent Ibos¹, Thibault Perin⁴

* ✉: laurice.elkhoury9@gmail.com

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

² University of Bordeaux, 16 Avenue Léon Duguit, 33600 Pessac

³ Polytech Belle-Beille-BEMS-LARIS, 62 Avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers,

⁴ Univ Paris Est Créteil, CERTES, F-94010 Créteil, France

Mots clés : panneaux d'isolation thermique, conductivité thermique, déchets d'éléments d'ameublement, analyse de cycle de vie.

Résumé :

Dans le cadre de la transition vers la neutralité carbone d'ici 2050 en France, la gestion durable des déchets constitue un enjeu majeur. Les combustibles solides de récupération (CSR) des déchets des éléments d'ameublement (DEA) sont des déchets non recyclés, composés d'un mélange hétérogène (bois, mousse, textile,...). Actuellement, les CSR sont principalement valorisés énergétiquement. Cette étude explore la possibilité d'intégrer les CSR dans le développement de matériaux d'isolation destinés au secteur du bâtiment, contribuant ainsi à une économie circulaire. Le caractère hétérogène des CSR a présenté un défi majeur lors des manipulations. En conséquence, nous avons suivi les recommandations de la RILEM concernant la méthode de quartage, qui a été appliquée, comme phase préparatoire avant toute manipulation ou formulation de panneaux pour garantir un échantillon représentatif. Une analyse granulométrique combinant deux méthodes : le tamisage et l'analyse d'images à l'aide d'un microscope et du logiciel ImageJ est abordée. La nature des matériaux présents dans les DEA a été identifiée par spectrométrie IR en mode ATR et leur stabilité en température par analyse thermogravimétrique. Les propriétés thermiques des CSR ont été évaluées à l'aide de deux méthodes : le Hot Disk et la boîte chaude gardée. Les mesures faites avec le Hot Disk pour plusieurs masses volumiques ont été réalisées avec un tube de compactage spécialement conçu pour ajuster la densité pendant les mesures. Les résultats montrent une conductivité thermique variant entre 0.067 et 0.080 W/m·K en fonction des masses volumiques testées allant de 89 kg/m³ à 266 kg/m³. En parallèle, une Analyse de Cycle de Vie (ACV) a été réalisée, divisée en deux phases : la production des CSR et la fabrication des panneaux. Dans cet article, seule la première phase sera traitée. Les résultats préliminaires suggèrent que les CSR pourraient offrir une solution d'isolation thermique innovante.

Analyse in-situ de la résistance thermique de parois d'une construction en terre crue

Junior Dias Tavares¹, Mostafa Mortada¹, Laurent Ibos¹, Yan Ulanowski², Julien Waeytens², Kamel Zibouche³, Vincent Feuillet¹

* ✉: laurent.ibos@iutsf.org

¹ CERTES / Université Paris-Est Créteil

² Université Gustave Eiffel

³ CSTB

Mots clés : construction terre crue, résistance thermique, diagnostic in-situ

Résumé :

Les travaux proposés dans cette communication font partie du projet RESBIOBAT (ANR-21-CE22-0018) qui vise à mettre au point des méthodes de diagnostic thermique de l'isolation de parois de bâtiments utilisables in-situ. L'étude concerne l'estimation de la résistance thermique des parois d'une maisonnette en Blocs de Terre Comprimée (BT_C) instrumentée, construite dans la mini-ville 2 de l'équipement Sense-City de l'université Gustave Eiffel à Champs-sur-Marne, à partir des données des capteurs situés en surface des parois (température et flux de chaleur), en utilisant la méthode ISO 9869-1. Plusieurs campagnes de mesure ont été effectuées en climat naturel extérieur en conditions hivernales, estivales et de mi-saison (printemps). En conditions hivernales et de mi-saison, deux scénarios de chauffage de la maison ont été appliqués pendant deux semaines (régulation à 20°C, intermittent jour-nuit), afin d'évaluer l'effet des conditions climatiques sur les résultats des estimations de résistance thermique. L'étude de deux parois d'orientation différente (Nord et Sud) permet d'identifier l'effet du rayonnement solaire sur les estimations de résistance thermique. La résistance thermique obtenue est inférieure à la valeur de référence obtenue à partir de caractérisations des BT_C en laboratoire. L'écart constaté s'explique par la présence de joints plus conducteurs entre les BT_C et la variation de la conductivité thermique avec la teneur en eau. La méthode de mesure est moins robuste en mi-saison du fait d'un faible gradient thermique intérieur-extérieur et en présence d'apports solaires importants sur la paroi Sud. L'utilisation des températures d'air permet également d'évaluer les résistances superficielles d'échange : ces estimations sont très sensibles aux conditions climatiques. Une STD effectuée sous Pléiades a permis de comparer des résultats de simulation (puissances de chauffage et variation d'humidité à l'intérieur de la maisonnette) aux valeurs expérimentales.

Caractérisation et simulation du comportement thermique d'éco matériau composite à base de terre de barre et fibre de coco.

Ayihaou Armand Djossou¹, Koffi Judicaël Agbelele², Crédo Aimé Ange-Marie Mahugnon Gbegbo³, Comlan Aristide Houngan²

* ✉: ayihaou@yahoo.fr

¹ Institut National Supérieur de Technologie Industrielle (INSTI) de Lokossa/UNSTIM-Abomey

² Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Lokossa/UNSTIM

³ Ecole Supérieure de Génie Civil Véréchaguine (ESGC-VAK)

Mots clés : Composite, simulation, fibre de coco, caractéristiques thermiques, éco matériau.

Résumé :

Cette étude explore les performances thermiques et mécaniques d'un éco composite à base de la terre de barre et de fibres de coco en vue d'améliorer le confort thermique des bâtiments tout en limitant les impacts environnementaux. Des essais thermiques et mécaniques ont été faits avec des outils appropriés sur plusieurs mélanges de terre et fibres de coco. Des simulations ont été faites appréhender la distribution de la température à la surface et à l'intérieur du matériau. Les résultats ont montré que l'ajout de 3% à 4% de fibres améliore significativement la stabilité thermique et la résistance mécanique du composite.

Analyse de l'efficacité du type et du mode de fonctionnement de protections solaires mobiles sur un logement individuel à partir de simulations thermiques dynamiques

Laurent Ibos¹, Damien Gehl¹, Ilyes Redjala², Herve Lamy³, Yannick Michon³

* ✉: laurent.ibos@iutsf.org

¹ CERTES / Université Paris-Est Créteil

² IUT de Sénart-Fontainebleau, Département Génie Civil Construction Durable

³ Groupement Actibaie

Mots clés : confort d'été, protections solaires, efficacité énergétique

Résumé :

Dans le contexte actuel de changement climatique, les épisodes caniculaires en période estivale sont de plus en plus fréquents et d'une amplitude et d'une durée plus importantes que par le passé. Cette situation est vouée à s'accroître dans les prochaines décennies. Le recours à la climatisation pour assurer des températures intérieures supportables doit par ailleurs être limité de manière à maintenir des consommations énergétiques de bâtiments les plus basses possibles. Les solutions à ce problème de confort d'été passent par une meilleure conception des bâtiments, par exemple l'installation de protections solaires. Différentes solutions existent (protections fixes de façade ou de menuiseries, protections mobiles) et des avancées techniques récentes ont permis d'optimiser leurs propriétés et leur usage.

L'efficacité de cinq protections solaires mobiles (Volets Roulants, Brise-Soleil Orientables intérieur ou extérieur, stores enrouleur intérieur ou extérieur) avec trois modes de fonctionnement (manuel, motorisé, automatique) a été étudiée pour le cas d'une maison individuelle des années 70, rénovée avec un niveau d'isolation correspondant à celui de la construction neuve RT 2012. L'effet des différents systèmes et modes de fonctionnement sur le nombre de degrés-heures d'inconfort, la température maximale, le besoin en énergie pour la climatisation et global est étudié par simulation thermique dynamique, grâce à des scénarios d'occultation créés à partir d'organigrammes de fonctionnement des protections solaires et de données météorologiques pour différents climats. Une réduction significative des valeurs des températures maximales et des degrés-heures d'inconfort est observée avec une tendance à une meilleure efficacité des protections solaires en mode de fonctionnement automatique. Ce travail, issu d'une collaboration entre l'organisation professionnelle Groupement Actibaie et l'UPEC a servi de support pédagogique aux étudiants de BUT GCCD de l'IUT de Sénart-Fontainebleau.

Caractérisation de la qualité de l'interface thermosoudée entre deux composites thermoplastiques

Pierre Waroquier¹, Steven Le Corre², Arthur Lévy², Jean-Luc Bailleul²

* ✉: pierre.waroquier@univ-nantes.fr

¹ IRT Jules Verne / LTeN

² LTeN

Mots clés : composites; thermoplastique; contact intime; soudage isotherme; adhésion;

Résumé :

L'utilisation des matériaux composites, à fortes propriétés intrinsèques, est déjà reconnue dans le cadre de l'allègement des structures. Cependant, le développement de matrices thermoplastiques hautes performance ouvre un nouveau champ d'investigation : le thermo-soudage de composite, sujet de nombreux développements technologiques actuels dans le secteur aéronautique.

Dans le cadre de ce travail, un banc thermo-contrôlé a été développé. Il permet de réaliser des essais de soudage en conditions contrôlées proches de celles observées dans l'industrie : température d'interface jusqu'à 400°C, pression jusqu'à 30 bars, temps de maintien de la pression pouvant descendre à 0.1s. Les vitesses de refroidissement aux interfaces soudées peuvent atteindre 40K/s, ce qui permet de figer le matériau en passant rapidement sous sa température de transition vitreuse.

À ce jour, la caractérisation mécanique des interfaces ainsi soudées est réalisée en conditions isothermes, ce qui a permis de développer des modèles de cinétiques d'adhésion à différentes températures et différentes pressions. Le nouveau banc développé nous permet de réaliser des expériences en mode anisotherme qui est plus représentatif des procédés impliquant de l'adhésion tels que le surmoulage ou d'autres procédés de soudage (infra-rouge, induction, friction, ...). Les premiers résultats obtenus seront alors présentés et analysés.

Effect of front and side confinement on a vertical heated plate with two-phase cooling

Jean Daoud¹, Nicolas Baudin¹, Stéphane Roux¹, Jérôme Bellettre¹

* ✉: jerome.bellettre@univ-nantes.fr

¹ LTeN

Mots clés : Confined boiling ; two-phase cooling ; experimental study.

Résumé :

A test bench containing a $64 \times 40 \text{ mm}^2$ vertical heated plate is filled with 3M Novec7000 dielectric fluid at atmospheric pressure. The wall heat fluxes are varied from 0 to 20 W.cm^{-2} . Temperature measurements and heat flux calculations are made using thermocouples. Observations are done using a high-speed camera through a glass window. The heated plate can be moved using a micrometric screw. Thus, the confinement between the heated plate and the glass window can be varied from 0.5 to 15 mm.

New experiments have been conducted to study the flow of the refrigerant and its effect on the dissipation of heat fluxes. U-shape PVC plates have been used to border the heated plate. High speed visualisations show that the flow trajectory is forced to cycle only along the heated part and not around. This additional side confinement increases the heat transfer between the wall and the fluid in comparison to the configuration without the U-shape plates. However, the critical heat flux is decreased. Indeed, it may be explained by the recirculating flow, strong enough to pull bubbles down, which could bring the bubble crowding and coalescence earlier.

Évaluation du potentiel des stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie : comparaison entre les méthodes psychrométriques et la modélisation dynamique

Habiba Kazeoui¹

★ ✉: habiba.kazeoui@univ-bejaia.dz

¹ UNIVERSITE DE BEJAIA

Mots clés : TRNsys; analyse bioclimatique; confort thermique; stratégies passives de climatisation

Résumé :

La consommation d'énergie et le confort thermique dans les bâtiments sont fortement influencés par les conditions climatiques. Dans ce travail, on évalue le potentiel de quelques stratégies passives de chauffage et de rafraîchissement en Algérie, en comparant deux outils d'analyse : la méthode psychrométrique et la modélisation dynamique.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le logiciel Climate Consultant pour réaliser une analyse bioclimatique des différentes zones climatiques en Algérie. Cette analyse a permis d'identifier les stratégies passives les plus efficaces pour chaque zone, en fonction des données climatiques locales. Le potentiel de ces stratégies pour améliorer le confort thermique des occupants tout en réduisant la consommation énergétique a été évalué.

Dans un second temps, nous avons modélisé et simulé le comportement thermique d'un local en utilisant le logiciel TRNSYS. Ces simulations ont permis de comparer les résultats de l'analyse psychrométrique avec ceux obtenus par la modélisation numérique. L'objectif de cette comparaison est d'évaluer la pertinence des outils graphiques dans les différents climats. Les résultats permettent aux architectes et aux urbanistes de mieux comprendre le climat et de fournir des conseils pratiques en matière de conception.

La combinaison des analyses bioclimatiques et des simulations dynamiques constitue une approche stratégique pour relever les défis climatiques et énergétiques actuels en Algérie. Cette approche contribue de manière significative à la transition vers des bâtiments plus durables et à faible empreinte carbone.

Optimisation du dimensionnement d'un condenseur à ailettes creuses interconnectées en polymère

Yoann Seyve¹, Frédéric Lefèvre¹, Serge Cioulachtjian¹, Valérie Sartre¹

* ✉: yoann.seyve@insa-lyon.fr

¹ CETHIL UMR 5008, INSA Lyon

Mots clés : thermosiphon diphasique, condensation, refroidissement de l'électronique, polymère

Résumé :

L'évolution rapide de l'électronique de puissance pousse le développement de nouveaux dispositifs de refroidissement plus compacts, légers et performants. Le thermosiphon diphasique en polymère est un bon candidat pour répondre à cette problématique de par sa capacité à évacuer un flux de chaleur important avec une faible différence de température et le faible poids du polymère. Des travaux précédents menés au CETHIL sur des thermosiphons diphasiques à ailettes creuses en polymère ont permis de montrer leur efficacité thermique. Cependant, ces systèmes sont limités par la formation de bouchons de liquide lorsque le diamètre interne des tubes est inférieur au diamètre capillaire. Des dispositifs originaux comportant des tubes interconnectés ont également été testés et ont montré leur capacité à déstabiliser ces bouchons.

L'objectif de la présente étude est de poursuivre dans un premier temps le travail expérimental sur l'interconnexion des ailettes creuses afin de déterminer si un diamètre minimal de fonctionnement existe pour ces ailettes. Pour cela, des tubes interconnectés de diamètres variant entre 2 mm et 0.8 mm sont testés afin de déterminer si des bouchons se forment pour des petits diamètres.

Dans un second temps, il s'agit de proposer une géométrie optimale pour le condenseur aileté, prenant en compte les différentes résistances thermiques du système. En effet, la réduction du diamètre des ailettes influence la géométrie du condenseur (diamètres interne et externe des tubes, hauteur, disposition, nombre de tubes, etc.). Une modélisation, reposant sur les corrélations pour des batteries à ailettes, est proposée et permettra de sélectionner les combinaisons de paramètres qui optimisent les performances thermiques du condenseur, et les pertes de charge associées.

Experimental and numerical study of constrained melting of metallic phase change material (PCM)

Judy Rosso¹, Grégory Largiller², Simon Li³, Frédéric Topin⁴

* ✉: judy.rosso@cea.fr

¹ CEA, LITEN, DT_CH, Thermal Storage Laboratory, Grenoble, France; Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DT_CH, Thermal Storage Laboratory, Grenoble, France

³ CEA-Cadarache, Saint-Paul-lez-Durance, France

⁴ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France; LAPLACE, UMR CNRS-INP-UPS 5213, University of Toulouse, France

Mots clés : Thermal energy storage; Phase change material; Melting; Zn-Al alloy

Résumé :

The ATRUIM reactor design, a loop-type Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), stems for the necessity of enhanced safety. One of the key safety features of this concept is the design of a compact and passive Decay Heat Removal System (DHRS). This component is tasked with storing the excess heat from the nuclear core during an emergency shut down, operating without external intervention and electricity for multiple days. To ensure the system's compactness, the design choice fell onto a modular storage, where the metallic PCM selected to store the excess thermal heat, Zamak (Zn-4%Al), is encapsulated in multiple SS430 boxes.

In working condition, the PCM will undergo a solid-liquid phase change while in contact with the inside walls of the stainless steel box. In order to develop a representative CFD model to describe the phase change of Zamak and its mechanical and chemical interactions with the walls, the material properties and behaviours under transient melting conditions must be investigated. At laboratory scale, some necessary experimental measurements have been performed (TMA, DSC) to obtain the physical and chemical parameters required to characterize the materials and their sensibility in the numerical model.

An experimental setup representative of the elementary unit box of the DHRS is built to validate the CFD model at a larger scale (25x15x15cm). Since the PCM is enclosed in the box, it is not possible to directly observe the melting process. One of the possible ways explored to follow the position of the melting front is to reconstruct it using inverse method by recording the temperature map of the outside of the box with IR imaging and correlating it to the temperature simulated according to the thermal conditions inside the box.

The CFD physics' models employed have shown good capabilities of simulating the phase change process. The experimental campaign on material characterization and on the setup representative of the elementary unit box will continue.

Contrôle des conditions de mise en forme d'une pièce composite à matrice thermodurcissable de très forte épaisseur

Rita Moussallem¹, Jean-Luc Bailleul¹, Vincent Sobotka¹

* ✉: rita.moussallem@univ-nantes.fr

¹ Nantes Université – UMR CNRS 6607 - Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes

Mots clés : Optimisation, Procédés de mise en forme, Thermodurcissable, Réticulation

Résumé :

Depuis une trentaine d'années, les matériaux composites prennent une place croissante au sein des pièces structurelles en raison de leur légèreté et de leurs hautes propriétés mécaniques spécifiques. Certains domaines d'application engendrent la nécessité de développer des pièces de très fortes épaisseurs. Leur mise en œuvre de manière maîtrisée devient alors un verrou fort. En effet durant la réticulation d'une résine thermodurcissable, la thermique et la chimie sont fortement couplées de par la thermodépendance de la réaction chimique et sa forte exothermie. Une contrainte est donc liée au contrôle et à l'évacuation de la chaleur dans un matériau thermiquement isolant.

La contribution de ce travail se situe dans l'amélioration du contrôle thermique des procédés de mise en forme afin d'assurer une qualité maximale à la pièce réalisée. Cette optimisation contribue ainsi in fine à la minimisation des contraintes résiduelles et donc à l'amélioration de la performance mécanique des pièces composites élaborées. Des travaux similaires ont été réalisés précédemment sur des pièces composites d'une épaisseur d'environ 10 mm. L'objectif actuellement visé est d'estimer les conditions aux limites permettant de vérifier un critère lié au profil de transformation de la matière pour des épaisseurs de l'ordre de 20 cm. Une première problématique à envisager est d'observer la sensibilité de la transformation aux conditions limites imposées en fonction de l'épaisseur de la pièce composite. La contrainte principale de cette application réside dans le fait que le gradient thermique est plus accentué dans ce cas, ce qui risque d'engendrer de fortes hétérogénéités.

Etude numérique de dimensionnement et d'optimisation d'un caloduc spatial innovant

Mathilde Bois¹, Simon Basset¹, Bénédicte Champel¹, Mathieu Mariotto¹, Michel Gradeck²

* ✉: mathilde.bois@cea.fr

¹ CEA

² LEMTA

Mots clés : Caloduc; Capillarité; Modélisation; Evaporation; Milieu poreux

Résumé :

Les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur très performants dont le fonctionnement se base sur le changement de phase d'un fluide à l'intérieur d'une enceinte fermée. Ils sont couramment utilisés sur les satellites de télécommunications pour assurer le contrôle thermique des éléments embarqués. Le caloduc étudié dans ce travail de recherche se caractérise par une géométrie et un mode de fabrication innovants, conçus pour repousser certaines limites de fonctionnement (limite capillaire et limite d'ébullition) par rapport aux caloducs conventionnels. A l'évaporateur, un montage capillaire appelé "ménisque inversé" est configuré. L'objectif principal de cette étude est de modéliser et d'optimiser un caloduc intégrant ce type d'évaporateur. Un modèle numérique couplé est mis en œuvre : pour l'analyse locale de l'évaporateur, un modèle thermique 2D a été retenu en raison de l'uniformité des phénomènes thermiques le long de la longueur, simplifiant ainsi les calculs. Ce modèle est associé à un modèle global 0D/1D pour le composant caloduc. Le logiciel de simulation numérique Flow Simulation de SolidWorks est utilisé pour évaluer les champs de température à l'évaporateur et les conductances thermiques locales. Une étude de sensibilité sur les paramètres géométriques de l'évaporateur (nombre, largeur, hauteur des piliers) est menée afin de définir les configurations optimales. Le logiciel Engineering Equation Solver (EES), via un modèle analytique, permet de calculer les pertes de charge pour les configurations de caloduc. La limite capillaire est déterminée et confrontée à l'estimation de la limite d'ébullition. Ce couplage permet d'identifier les configurations optimales pour maximiser la conductance thermique globale et la puissance maximale supportable avant la défaillance de ce type de caloduc innovant.

In-hive temperature evolution: comparison between measurements and simulations

Emmanuel Ruffio¹, Delphine Jullien², Anne Lavalette¹, Anna Dupleix¹

* ✉: emmanuel.ruffio@alt-rd.com

¹ CoActions-AltRD

² LMGC – UMR 5508

Mots clés : thermal modeling, instrumented beehive, field measurement, sensitivity analysis

Résumé :

Nowadays beekeepers are facing environmental challenges that threaten their profession. Bee colonies are under pressure of several factors: parasites (varroa mites), invasive species (hornets), chemicals and weather. We are studying the impact of hive geometry and materials on the in-hive temperature which is a key parameter since bees have to thermoregulate the brood nest for proper development. The initial aim is to understand and quantify thermal interactions between the environment and the hive, as well as heat transfer within the hive. We will then be able to advise beekeepers on possible actions to be taken to modify the temperature inside the hive, either upwards or downwards as needed.

For this purpose, an experimental apiary is equipped with 2 instrumented empty Dadant hives with several temperature and humidity sensors. The close environment of the hives is characterized using a set of sensors (temperature, irradiance, anemometer, infrared, etc.). A thermal model of the hive and its close environment was implemented using Octave software based on a library we have developed. This library allows various volumes to be defined using Finite Volume Method. These elements are then connected together using uniform or non-uniform thermal conductances. Heat radiation in the body part of the hive is introduced using the radiosity method.

This article presents the main assumptions and equations of the model. A comparison is then performed between simulations and measurements with environmental data used as model input. A sensitivity analysis is also conducted to identify the some influential parameters on in-hive temperatures.

This research was funded by the Agropolis foundation (HaBeeTaT project) and by the European Better-B project (101081444-Better-B) in the frame of European Programme HORIZON-CL6-2022-BIODIV-02-two stage on resilient beekeeping (2023-2027).

Impression 3D de structures en carbone ouvertes pour la production de vapeur d'eau par distillation solaire

Romain Fillet¹, Vincent Nicolas¹, Pauline Blyweert¹, Jimena Castro-Gutiérrez¹, Benoît Rousseau², Alain Celzard³, Vanessa Fierro¹

* ✉: vincent.nicolas@univ-lorraine.fr

¹ Institut Jean Lamour

² LTeN, CNRS, UMR 6607, Nantes University

³ Institut Jean Lamour / Institut Universitaire de France (IUF)

Mots clés : Matériaux biosourcés ; Évaporation solaire ; Transferts de chaleur et de masse ; Production d'eau

Résumé :

Le réchauffement climatique perturbe le cycle de l'eau, entraînant des sécheresses, des inondations et une raréfaction de l'eau potable. La gestion durable de cette ressource est essentielle pour limiter ces risques. La distillation solaire est un procédé qui utilise l'énergie solaire pour évaporer l'eau et la condenser, permettant ainsi d'obtenir une eau purifiée. Ce système repose sur l'effet de serre : l'eau s'évapore sous l'action du rayonnement solaire, puis se condense sur une surface froide avant d'être collectée. Il présente plusieurs avantages, notamment l'absence de consommation d'énergie fossile, un faible coût d'entretien et une adaptation aux zones isolées. Ce procédé écologique permet de produire de l'eau potable à partir d'eaux saumâtres ou contaminées, et contribue ainsi à la lutte contre la pénurie d'eau.

Des structures de carbone biosourcées, réalisées par impression 3D, caractérisées par une macroporosité ouverte, ont été utilisées pour améliorer la production de vapeur par distillation solaire. Ces structures 3D ont été imprimées par stéréolithographie laser à l'aide d'une résine acrylate-tannin. Après pyrolyse et activation physique éventuelle, les structures de carbone 3D résultantes ont été utilisées comme évaporateurs solaires. L'activation avec du CO₂ et de la vapeur d'eau a permis d'obtenir des structures de carbone en 3D présentant une surface spécifique élevée et une teneur en oxygène accrue, ce qui a permis d'augmenter la sorption de l'eau. Les performances d'évaporation solaire ont atteint 2,45 kg m² h⁻¹ sous une illumination solaire et un faible flux de convection, 0,3 m s⁻¹, et ont augmenté à 7,32 kg m² h⁻¹ en utilisant un flux de convection forcée, 4,5 m s⁻¹. Ces résultats montrent que les matériaux carbonés imprimés en 3D sont des architectures prometteuses pour l'évaporation solaire, en particulier dans un système complet de distillation de l'eau avec un flux d'air forcé.

Développement d'un composite MCP à base de cire d'abeille pour une gestion thermique optimale des piles à combustible PEMFC

Mohamed Moussa El Idi¹, Atilla Atli², Manel Kraiem³, Ahmad Hajjar⁴, Mustapha Karkri³

* ✉: moussa.elidi@gmail.com

¹ IMT Nord Europe, Institut Mines Télécom, Univ. Lille, Center for Energy and Environment

² ECAM LaSalle

³ Université Paris- Est, CERTES

⁴ Center for Environmental Intelligence and College of Engineering and Computer Science

Mots clés : Gestion thermique; PCM; PEMC; Cire d'abeille; Pile à combustible

Résumé :

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) constituent une solution crédible pour décarboner la mobilité lourde. Alimentées en hydrogène, ces piles produisent de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Un stack PEMFC dans des applications embarquées génère une quantité significative de chaleur résiduelle, qui peut atteindre ou même dépasser l'électricité produite de 20%. Cette chaleur doit être gérée efficacement pour éviter une dégradation des performances et de la durabilité du système. Des études récentes ont mis en évidence le potentiel des matériaux à changement de phase (MCP) pour la gestion thermique des PEMFC. Les MCP ayant une température de changement de phase proche de la température de fonctionnement optimale d'une PEMFC permettent non seulement de maintenir son fonctionnement optimal sur le plan thermique, mais aussi, dans des environnements à températures négatives, de conserver la pile à l'arrêt sur de longues périodes autour de cette température idéale.

Les matériaux n'ayant pas d'impact environnemental sont des choix d'excellence pour la conception des MCP. Dans ce contexte, ce travail vise à développer des composites MCP à base de cire d'abeille naturelle, puis à les intégrer dans un modèle multiphysique d'une cellule PEMFC afin d'étudier leur impact sur le comportement thermique du système. Une première étape de caractérisation de la cire d'abeille a été réalisée, révélant des résultats satisfaisants en termes de chaleur latente et de température de changement de phase. Cependant, le MCP présente une faible conductivité thermique, ce qui réduit la cinétique du changement de phase. Pour remédier à ce problème, des microparticules de graphite ont été ajoutées. Les résultats montrent qu'en ajoutant 10 %m de graphite (environ 4,5%v), la conductivité thermique augmente proche de 50 %. Les travaux visant à intégrer ce composite dans une cellule PEMFC sont en cours.

Optimisation de la conception des parois du bâtiment pour la réduction des consommations énergétique

William Dumontaud¹, Julien Berger¹, Benjamin Kadoch²

* ✉: william.dumontaud@univ-lr.fr

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

² Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI

Mots clés : conception des parois du bâtiment ; efficacité énergétique ; transfert de chaleur 2D ; modélisation numérique ; schéma de DuFort-Frankel

Résumé :

Le travail présente une méthode d'optimisation innovante pour la conception des parois du bâtiment. L'approche proposée consiste à minimiser la consommation d'énergie d'un mur de bâtiment en adaptant la forme de l'interface entre les matériaux constitutifs, soit les parties porteuse et isolante. Le problème direct considère une équation de transfert de chaleur 2D en régime transitoire résolue par le schéma de différences finies de DuFort Frankel. Les conditions limites appliquées aux surfaces sont convective à l'intérieur, convective avec un rayonnement en courtes longueur d'onde à l'extérieur et adiabatique sur les surfaces horizontales. Les coefficients de ces conditions varient suivant le temps et l'espace. L'interface entre les matériaux de la paroi est modélisée par une fonction analytique qui permet de définir la répartition des propriétés thermiques du mur dans l'espace.

Concernant la minimisation, la fonction objective est définie comme le flux thermique total sur la partie intérieure du mur. Elle est optimisée en modifiant les coefficients de l'équation analytique régissant l'interface et en respectant la contrainte de proportion entre l'isolant et le matériau porteur donnée par la configuration standard.

Enfin, une étude de cas située dans la ville de Chambéry en France montre l'efficacité de la stratégie numérique en exposant le cas optimisé obtenu.

Modèle saisonnier de pont thermique

Edouard Walther¹, Marie-Hélène Azam¹, Maxime Arenas-Leurent¹

* ✉: edouard.walther@insa-strasbourg.fr

¹ INSA Strasbourg

Mots clés : pont thermique; transitoire; clustering

Résumé :

Les exigences actuelles environnementales et énergétique conduisent à la construction de bâtiments neufs de mieux en mieux isolés. Dans ce contexte, les ponts thermiques deviennent un point non négligeable du bilan énergétique des bâtiments. D'après Hua Ge et al. 2015, les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 30% des besoins d'un bâtiment performant.

Les modèles de STD de bâtiment actuellement développés se basent sur une modélisation 1D des transferts thermiques dans les parois. Pour intégrer de manière rigoureuse les ponts thermiques une modélisation 3D serait nécessaire. Cette option n'est actuellement pas développée dans les logiciels de STD à l'échelle d'un bâtiment car très couteuse en temps de calculs.

Les ponts thermiques ne pouvant pas être modélisés directement, ils sont alors intégrés à l'aide d'un coefficient ψ linéique ou ponctuel. Ce coefficient est le résultat de l'utilisation d'un modèle de paroi équivalente. Il simplifie de manière significative le problème, sous estimant donc l'impact des ponts thermiques sur le bilan énergétique.

On se propose ici d'explorer une piste intermédiaire en proposant le calcul d'un coefficient ψ transitoire. Ce coefficient sera ensuite intégré au bilan énergétique d'un bâtiment simple. Afin d'optimiser la méthode, nous proposons de tester la saisonnalité de ce coefficient à l'aide de méthode de clustering. Elle a déjà montré ses performances dans d'autres contextes (Ribault 2017, Azam et al. 2019) et pourrait permettre d'obtenir d'une valeur de coefficient ψ par saison. Cette nouvelle approche permettrait d'améliorer le bilan énergétique du bâtiment tout en maîtrisant les temps de simulation.

Development and Optimization of Electrically Resistant Paint for Road De-Icing: A Numerical and Experimental Study

Pengfei Cao¹, Xiaofeng Guo¹, Laurent Royon¹, Frédéric Filaine¹

* ✉: pengfei.cao@u-paris.fr

¹ Université Paris Cité - Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain (LIED)

Mots clés : De-icing, Electrically resistant paint, Thermal contact resistance, Temperature distribution, Road safety

Résumé :

Icing on roads poses serious risks to transportation, infrastructure, and safety, demanding effective de-icing solutions. This study presents an electrically resistant paint for road de-icing, evaluating its physical, thermal, and electrical properties. The system features a sandwich structure with a surface course, a paint layer (20% carbon black, 20% resin and 60% water), and a base course, where the paint serves as a heating element to transfer heat to the surface.

Key performance factors, including electrical power, thermal contact resistance, and paint-layer defects, were examined. A two-dimensional numerical model in COMSOL Multiphysics simulated system behavior under various electrical power levels and included a 0.35 mm air layer to represent thermal contact resistance. Experiments validated these models using granite as a surrogate for asphalt and the paint layer in a -20 °C environment. A three-dimensional numerical model further studied the effects of paint defects, validated through experiments with a 5 cm hole in the paint layer.

The results identified 450 W/m² as the optimal power for efficient and cost-effective de-icing, achieving 0 °C at the surface despite a 30-minute delay caused by thermal contact resistance. Increasing paint thickness or adding an intermediate asphalt layer reduced this delay to 5 minutes. Additionally, the system maintained effective temperature uniformity even with defects, limiting temperature variation to 1.5 °C at 654 W/m².

This research demonstrates the feasibility of electrically resistant paint as an innovative, energy-efficient de-icing solution. Addressing challenges such as thermal contact resistance and defects enhances the system's practicality, providing valuable insights for real-world applications.

Air-based sensible thermocline thermal energy storage numerical modelling and optimization over a charge-standby-discharge cycle

Raoul Ouambo Tobou¹, Jérôme Soto², Nicolas Baudin³, Yilin Fan³, Frédéric Lontsi¹

* ✉: raoul.ouambo@ucac-icam.com

¹ UCAC-ICAM

² Icam School of Engineering, Nantes campus

³ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes, LTnN, UMR6607

Mots clés : Heat storage;thermocline;modelling;neural network;optimization

Résumé :

Air-based sensible thermocline heat storage is a cost-effective thermal energy storage solution. Its operational sequence involves a standby storage period, currently lacking detailed modeling in the literature and usually omitted in the design workflows. In this work we have developed a detailed 2D simulation model also investigating the natural convection flow occurring in the standby phase. The model was validated experimentally for air temperatures up to 500°C. The importance of the standby time as key design parameter was shown, and finally a technico-economical design workflow was developed, based on a neural network surrogate modeling coupled to a NSGA-II optimization scheme.

étude numérique du refroidissement par immersion d'un pack de batterie lithium-ion

Taissir Kasraoui¹

* ✉: taissir.kasraoui@ipsa.fr

¹ ipsa/inrae

Mots clés : ébullition convective, écoulement diphasique, flux critique, emballement thermique

Résumé :

Le transport représente le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre en France. Dans cette démarche plusieurs constructeurs automobiles se sont lancés dans le domaine de l'électrique. Ces nouvelles technologies représentent la solution la plus adéquate pour la logistique urbaine et régionale. Cependant, les packs batterie présentent des contraintes comme les problèmes liés à la gestion thermique. En effet, les packs batteries actuels sont de plus en plus compacts ce qui amplifie le risque de l'emballement thermique qui se produit lorsqu'une cellule est endommagée ou lorsqu'elle dépasse une certaine température. Dans ce cas, la cellule s'échauffe spontanément ce qui peut provoquer un incendie ou une explosion. A cet issu, plusieurs techniques de refroidissement des batteries ont été développées. Nous citons le refroidissement par immersion dans un fluide diphasique isolant dans lequel baignent toutes les cellules du pack batterie. L'originalité du dispositif repose essentiellement sur les propriétés du fluide. Ce dernier possède une température d'ébullition assez basse (35 à 65 °C). Dès que la température dépasse ce seuil critique, le fluide se vaporise au niveau du point chaud, favorisant localement une forte absorption de chaleur. Ce phénomène est passif, ce qui garantit en théorie un maintien de l'extraction de la chaleur. Cette technologie consiste à bien choisir le bon fluide diphasique qu'il soit efficace sur le plan énergétique et vert sur le plan environnemental. C'est dans ce contexte ainsi qu'intervient notre travail qui consiste à étudier numériquement l'écoulement diphasique d'un liquide qui doit changer de phase pour maintenir la température, et évacuer la chaleur en situation accidentelle. Le faible espacement des cellules dans le pack induit un problème d'ébullition convective en mini canal vertical qui constitue un mode de transfert de chaleur très efficace pour dissiper les flux élevés.

Développement et caractérisation thermophysique de bio composite d'isolation à base de fibres de coir et gaines foliaires de cocotiers.

Ayihaou Armand Djossou¹, Wilfrid C. Adihou¹, Dieu-Donné Akotegnon¹, Luc A. Atchade¹, Clotilde T. Guidi¹, Aristide C. Houngan²

* ✉: ayihaou@yahoo.fr

¹ Institut National Supérieur de Technologie Industrielle (INSTI) de Lokossa/UNSTIM-Abomey

² Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de Lokossa/UNSTIM-Abomey

Mots clés : Fibres de coco ; gaines foliaires ; conductivité thermique ; valorisation des déchets ; bio panneau.

Résumé :

L'objectif de cette étude est de mettre au point un bio panneau isolant à base de fibres de coir et gaines foliaires de cocotiers et colle d'amidon. A cet effet, deux séries d'échantillons ont été formulés à base de fibres respectivement et colle d'amidon et de résine époxy prise comme témoin. Les essais thermiques ont été effectués avec la méthode du ruban chaud. Les résultats obtenus ont montré que les caractéristiques thermiques des échantillons d'amidon sont légèrement supérieures mais très proches de celles des échantillons de résine malgré une teneur en fibres élevée de 7 % à 9 % dans ces derniers par rapport aux échantillons d'amidon.

Vegetable oils as heat transfer fluids: literature review and thermal aging study under inert atmosphere

Jean Tallon¹, Valery Vuillerme¹, Arnaud Bruch¹

* ✉: jean.tallon@cea.fr

¹ CEA LITEN

Mots clés : Heat transfer fluid ; Vegetable oils ; Technical screening ; Thermal stability ; Thermal aging ; Standard characterization

Résumé :

Heat transfer fluids (HTFs) are key to thermal energy transport and storage in many systems. Their selection depends on their thermophysical performance, chemical and thermal stability, process compatibility, safety constraints, and cost. With rising concerns about decarbonization and sustainability, interest in non-toxic, biosourced and biodegradable fluids is also increasing. Yet most HTFs in use are still mineral, synthetic or silicone-based oils: oils remain the most suitable option, especially for medium temperatures, where water requires pressure and salts solidify. In this context, this work investigates the potential of vegetable oils as HTFs.

An extensive bibliographic and technical screening compared several vegetable oils with more than 40 of the most common commercial HTFs. Results show that vegetable oils are highly sensitive to oxidation and degrade rapidly above 250 °C even under inert atmosphere. However, below this threshold, they offer better thermal properties than most commercial oils, high flash points, and low vapor pressures. These features make them promising candidates for operating near atmospheric pressure and under the flash point, in applications under 250°C and without oxygen.

However, their use at industrial scale is limited by the lack of long-term thermal stability data under various conditions, especially under inert atmospheres. Additionally, standard methods commonly used to assess thermal stability of commercial HTFs are not directly applicable to vegetable oils.

To address this gap, an experimental study was undertaken to evaluate thermal aging under nitrogen. Two vegetable oils (rapeseed and high-oleic sunflower) were aged in autoclaves at temperatures ranging from 150 °C to 250 °C, for 400, 800, and 1200 hours. The samples were then characterized using standard techniques, with the aim of assessing degradation kinetics under these specific conditions. The study is ongoing, and initial results will be presented.

Optimisation thermique de la capture du CO₂ par des composites MOF-graphite: approches expérimentales et modélisation thermique

Moussa Hamieh¹, Xavier Py¹, Elissa El Rassy¹, Bakri Abdulhay²

* ✉: Moussa.Hamieh@univ-nantes.fr

¹ Nantes Université, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes (LTEN)

² ESAIP-Angers, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes (LTEN)

Mots clés : Capture du CO₂, Composites Metal Organic Frameworks (MOFs)-graphite, intensification conductivités thermique et électrique, TSA, Energie solaire, Effet Joule

Résumé :

La quête de matériaux efficaces et durables pour la capture du CO₂ est cruciale face aux défis environnementaux et énergétiques mondiaux. Les MOFs, reconnus comme des super-adsorbants pour le CO₂, offrent des capacités d'adsorption jusqu'à 60 % supérieures à celles des charbons actifs ou des zéolithes. Cependant, ces performances élevées s'accompagnent d'effets thermiques (adsorption exothermique, désorption endothermique) responsables d'une réduction jusqu'à 50 % des capacités de stockage, en affectant la sélectivité et ralentissant les cinétiques d'adsorption, tout en présentant des risques de points chauds.

Une approche innovante est développée dans le cadre de l'ANR TEM-MOF pour associer les MOFs au graphite, formant des composites conducteurs capables d'atténuer ces effets thermiques et de favoriser les processus isothermes d'adsorption/désorption.

Les MOFs à base d'acide gallique ont été synthétisés à l'IMN, les composites MOF-graphite ont été élaborés et testés au sein du LTEN et caractérisés à l'ICMN.

Les étapes de capture et restitution du CO₂ sont effectuées sur le mode Temperature Swing Adsorption. La régénération est effectuée à l'aide de sources renouvelables. Des proportions massiques de graphite de 10 %, 15 % et 20 % ont été testées.

Les tests de chauffage par effet Joule in situ ont validé l'usage potentiel de cette technique comme méthode de régénération. Les matériaux composites atteignent 70-80°C sous une alimentation à basse tension de 6V continue (Type PV). Ainsi le graphite permet à la fois de gérer les effets thermiques de sorption (via la conductivité thermique intensifiée) et de permettre une régénération électrothermique in situ (via la conductivité électrique intensifiée).

Le graphite confère au composite une absorbance intensifiée permettant une conversion rayonnement visible/chaaleur in situ ainsi qu'une bonne homogénéité en température. Des tests pilotes en capteur solaire plant ont été validés.

Optimisation des propriétés thermiques, mécaniques et rhéologiques d'un mortier contenant du matériau à changement de phase

Drake Atique Malanda¹, Noé Beaupere Noé Beaupere^{1,*}, Tien Tung Ngo¹

* ✉: noe.beaupere@cyu.fr

¹ Laboratoire de Mécanique et Matériaux pour le Génie Civil

Mots clés : Stockage d'énergie thermique ; mortier de ciment ; matériaux à changement de phase ; caractérisation ;

Résumé :

La diminution de la consommation d'énergie dans les bâtiments pourrait être réalisée grâce à l'emploi de Matériaux à Changement de Phase (MCP) encapsulés dans du mortier de ciment, qui limiteraient l'amplitude thermique d'un logement. L'objectif de ces travaux en cours est tout d'abord d'ajuster les paramètres de préparation d'un mélange de mortier de ciment et MCP sans endommager les micro-capsules. Une fois cette préparation optimisée, des échantillons de différentes compositions, préalablement définies, seront mis en forme. Elles seront ensuite évaluées en fonction de propriétés thermiques (chaleur spécifique, chaleur latente, conductivité thermique à fil chaud), mécaniques (résistance à la compression), rhéologiques (viscosité, contrainte seuil), microstructuraux (MEB, DRX). La compréhension de ces propriétés pour un mortier, modifiées par l'ajout de capsules de MCP, permettrait d'obtenir une formulation idéale en fonction des besoins. Cette composition pourrait ensuite être testée à l'échelle d'une paroi grâce à une chambre bi-climatique afin de tester son comportement sous différentes sollicitations thermiques et hydriques.

Caractériser la performance du rafraîchissement hybride dans un bâtiment de bureaux : focus sur le confort thermique

Simon Bal-Fontaine¹, Simon Rouchier¹, Arnaud Jay²

* ✉: simon.bal-fontaine@univ-smb.fr

¹ USMB LOCIE

² CEA LITEN

Mots clés : Ventilation naturelle ; brasseur d'air ; confort thermique

Résumé :

La problématique du confort thermique en période estivale va devenir un enjeu majeur pour les concepteurs de bâtiments. Actuellement, la climatisation active est la solution la plus répandue, mais elle entre en contradiction avec les Accords de Paris, la RE2020 et les objectifs de réduction des consommations d'énergie des bâtiments. Ainsi, l'utilisation de la ventilation naturelle associée à des brasseurs d'air (rafraîchissement hybride) pourrait constituer une réponse appropriée aux problèmes énergétiques et de confort dans les bâtiments. Toutefois, il est essentiel de garantir l'efficacité de ces systèmes pour encourager les concepteurs à favoriser leur installation.

Dans ces travaux, nous définissons la performance du rafraîchissement hybride selon trois leviers principaux : le potentiel climatique, le potentiel du bâtiment et l'efficacité du bâtiment. Le potentiel climatique correspond ainsi à la performance maximale dans un site et un climat donné, tandis que le potentiel du bâtiment désigne la performance d'un bâtiment donné avec un usage optimal des systèmes. Enfin, nous considérons le confort thermique des occupants comme la performance finale de la ventilation naturelle, qui représente l'efficacité du bâtiment en prenant en compte les contraintes d'usage et le comportement des occupants.

Ces travaux mettent en avant la pertinence de la SET pour la caractérisation du confort thermique dans un modèle simplifié de bâtiment de bureaux utilisant la ventilation naturelle ou des brasseurs d'air comme moyens de rafraîchissement. Ainsi, nous avons calculé l'indicateur d'inconfort thermique « Degrés-Heures » (DH) à partir de la SET et de la température limite d'inconfort du confort adaptatif. De même, la comparaison entre les DH basés sur la SET et ceux basés sur la température opérative permet d'identifier la nécessité d'utiliser la SET pour des systèmes de rafraîchissement impliquant des vitesses d'air sur les occupants.

Vers la Modélisation multiphysique de la fusion par laser d'un analogue de Régolithe lunaire : Caractérisations Thermo-optiques

Julien Granier¹, Yannick Le Maoult¹, Thierry Cutard¹, Patrick Pinet², Serge Chevrel², Thierry Sentenac¹

* ✉: julien.granier@mines-albi.fr

¹ Institut Clément Ader - Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA, UPS, ISAE SUPAERO

² Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), CNRS/CNES

Mots clés : Régolithe;SLM;modélisation;conductivité thermique;milieu granulaire;émissivité

Résumé :

Les procédés de fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre, en particulier le procédé SLM (Selective Laser Melting), offrent une piste prometteuse pour garantir l'autonomie des astronautes lors de missions de longue durée sur la Lune [Fateri,2015].

Dans cette démarche d'Utilisation des Ressources In-Situ (ISRU), un effort conjoint de l'IRAP et de l'ICA a permis de proposer un nouvel analogue de régolithe lunaire, baptisé BPY (Basalt of Pic d'Ysson), et de l'utiliser avec succès pour la fabrication additive d'objets. Leur microstructure et leurs propriétés mécaniques ont ensuite été analysées [Granier,2025].

Cependant, pour établir les liens entre la formulation du matériau de départ, les paramètres machines (puissance laser, vitesse de balayage...) et les microstructures obtenues, une connaissance fine du milieu granulaire est indispensable.

La modélisation du procédé repose ainsi sur la caractérisation :

- des propriétés granulaires (taille et forme des grains),
- des propriétés thermiques (conductivité effective combinant convection du gaz, radiation inter-grains et conduction intra-grain),
- des propriétés optiques et thermo-optiques (réflectivité à basse température, émissivité thermique mesurée de 600 à 1000 °C grâce à un banc expérimental dédié),
- ainsi que des transitions physico-chimiques du matériau.

L'application de modèles prédictifs, notamment pour la conductivité thermique — issus à la fois du domaine de la fabrication additive [Sih,2004] et de la planétologie [Mellon,2022] — permettra de mieux comprendre la sensibilité du système aux différents paramètres, en vue d'une simulation numérique sous COMSOL®. L'objet de ce Poster portera donc sur les caractérisations thermo-optiques du BPY.

Thermal-hydraulic conditions at and downstream of a quench front during a Loss-of-Coolant Accident in a Pressurized Water Reactor

Joao Marcelo Maris Da Silva Filho¹, Tony Glantz², Juan Luna Valencia², Arthur Vieira Da Silva Oliveira³, Alexandre Labergue¹, Michel Gradeck¹

* ✉: jmarcelomaris@gmail.com

¹ Université de Lorraine/CNRS/LEMTA

² Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection

³ Université de Sao Paulo/EESC/GOTAS

Mots clés : LOCA; Heat transfer; Boiling; Mass transfer

Résumé :

During a LOCA (Loss of Coolant Accident), the rapid rise in core temperature combined with a drop in external pressure may deform or even rupture the fuel rods of a PWR (Pressurized Water Reactor). To prevent core meltdown and the release of fission products outside the vessel, a safety system injects borated water through the base of the assembly to cool it. This causes intense boiling at the quenching front, generating a vapor-droplet flow that propagates downstream, further cooling the rods. This two-phase flow, known as DFFB (Dispersed Flow Film Boiling), has been previously characterized [1], and recent studies [2–5] have enhanced the understanding of cooling mechanisms associated with it. However, the link between droplet distribution — specifically diameter and velocity profiles — and heat and mass transfer at the quenching front remains unclear. This study investigates thermal-hydraulic conditions at the quench front and downstream under LOCA-like conditions. The project involves designing and constructing a new experimental bench simulating the fuel assembly at a subchannel scale. The platform will enable experiments varying key parameters: water injection temperature, wall temperature, and heat flux applied to the wall. A Phase Doppler Anemometer (PDA) will characterize the dispersed flow (droplet diameter and velocity), and an infrared camera will measure wall surface temperature. An inverse method will estimate the wall heat flux profile. These experimental data will support the development of accurate physical models for predicting droplet behavior, which may eventually be integrated into ASNR's DRACCAR code, aimed at improving core cooling predictions and safety.

Thème 9

Thermographie

Transfert de chaleur lors d'impact d'une goutte sur une surface chaude texturée	188
Investigation par radiométrie photothermique à balayage de la porosité des pièces fabriquées par fusion par faisceau d'électrons	189
Inversion d'images thermographiques à l'aide d'images de synthèse (« rendus infrarouges ») : validation expérimentale et test de différentes méthodes de rendus	190
Développement d'une méthode de mesure de résistance thermique de contact entre 2 cylindres à partir d'excitations et de réponses de température en face avant	191
Screening accéléré pour la découverte de matériaux multi-composants durables et innovants pour le stockage d'énergie	192
Thermographie infrarouge multi- et hyper-spectrale pour la mesure de hautes températures de matériaux opaques et semi-transparents	193
Application d'une aide à la décision multicritère pour la réhabilitation d'un hangar des Restos du Cœur	194
Première mesure du spectre de l'émissivité du tungstène avant et après exposition dans le tokamak WEST	195
Bubble nucleation quantification for a single droplet impact onto a heated substrate	196

Transfert de chaleur lors d'impact d'une goutte sur une surface chaude texturée

Thomas Potaufieux¹, Ophélie Caballina¹, Guillaume Castanet¹

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

¹ LEMTA, Université de Lorraine/CNRS

Mots clés : Refroidissement par spray; Impact de goutte; Thermographie par infrarouge; Ébullition nucléée et de transition; Mouillabilité.

Résumé :

Le refroidissement par spray est une méthode efficace de gestion thermique, mais son étude est complexe en raison des interactions entre la dynamique des gouttes et l'ébullition du liquide. La quantification précise du transfert de chaleur est cruciale pour mieux comprendre ces phénomènes. Bien que des aspects comme le temps de contact et l'étalement aient été étudiés, le transfert de chaleur associé à l'impact d'une goutte dans les régimes d'ébullition reste mal compris, en particulier l'influence des propriétés de surface sur l'étalement, la nucléation et la croissance des bulles.

Cette étude analyse le transfert de chaleur lors de l'impact d'une goutte d'eau sur une surface chauffée à l'aide de thermographie infrarouge et d'imagerie ombroscopique rapide. Un substrat de saphir est recouvert d'une fine couche de TiAlN ($2\ \mu\text{m}$) obtenue par PVD, avec une émissivité élevée. Une caméra infrarouge rapide (Telops M1K) mesure la température de la surface impactée à travers le saphir. Une méthode analytique basée sur les séries de Fourier et le modèle de quadripôle thermique permet de reconstruire le flux de chaleur en conservant une haute résolution spatiale et temporelle (2000 ips). Une correction est appliquée pour compenser la semi-transparence du saphir.

Une étude paramétrique faisant varier la vitesse d'impact (We 30-140), la température (80-300°C) et le type de surface : hydrophile ($CA < 15^\circ$) ou hydrophobe (85°). Les résultats montrent que la mouillabilité influence significativement l'étalement des gouttes et le transfert thermique. Sur les surfaces hydrophiles, les gouttes s'étalent davantage, tandis que les surfaces hydrophobes favorisent une nucléation intense, avec plus de bulles et de zones sèches. Ces différences créent des distributions spatiales et temporelles distinctes du flux. À 250°C, ces variations diminuent car les bulles se coalisent rapidement, entraînant un séchage accéléré et un temps de contact réduit dans les deux cas avec une thermosurréactivité.

Investigation par radiométrie photothermique à balayage de la porosité des pièces fabriquées par fusion par faisceau d'électrons

Alejandro Mateos Canseco¹, Andrzej Kusiak², Jean-Luc Battaglia², Matthieu Museau³, François Villeneuve³, Alexandre Margeuret⁴

* ✉: alejandromateoscanseco@u-bordeaux.fr

¹ I2M - UMR 5295

² I2M - UMR 5295 - Université de Bordeaux

³ G-SCOP - UMR 5272 - Univ. Grenoble Alpes

⁴ SIMAP Grenoble

Mots clés : Thermographie; Imagerie Infrarouge; contrôle non destructif; porosité; diffusivité thermique; radiométrie photo-thermique

Résumé :

La fabrication additive est devenue un procédé important dans la production de nouveaux prototypes et de structures aux géométries complexes, difficiles à obtenir par des techniques d'usinage, de déformation ou de fusion traditionnelles. Cette technologie permet en effet de créer des pièces tridimensionnelles directement à partir de modèles informatiques. Bien que la fabrication additive ne soit pas nouvelle, son utilisation connaît une croissance notable. Elle a été largement utilisée pour fabriquer des pièces métalliques fonctionnelles dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'énergie et des dispositifs médicaux, en raison de la flexibilité du procédé, qui permet de réaliser des géométries complexes. L'inspection et la détection des défauts, tels que des porosités, sont essentielles afin d'assurer la qualité des produits finaux.

Parmi les techniques de fabrication additive, la fusion par faisceau d'électrons (EBM) est particulièrement utilisée pour la fabrication des pièces en alliage de titane (Ti-6Al-4V). Les échantillons de Ti-6Al-4V issus de ce procédé constituent l'objet d'étude de ce travail. Dans le cadre du contrôle non destructif des pièces produites par la fabrication additive, cette recherche est focalisée sur l'investigation de la porosité à l'aide d'images obtenues par radiométrie photothermique à balayage. La variation de la porosité du matériau fabriqué en fonction de la paramétrie du procédé EBM est mise en évidence à partir d'images photothermiques. En effet, la signature thermique mesurée est impactée par des changements de la diffusivité thermique apparente du matériau. Cette dernière étant altérée par la présence de pores dans le massif.

Inversion d'images thermographiques à l'aide d'images de synthèse (« rendus infrarouges ») : validation expérimentale et test de différentes méthodes de rendus

Léa Penazzi¹, Fabrice Rigollet¹, Stéphane Blanco², Christophe Coustet³, Jérémie Dauchet⁴, Nathalie Ehret¹, Vincent Eymet³, Vincent Forest³, Jonathan Gaspar¹, Jacques Gautrais⁵, Maxime Roger⁶, Lucas Venobre¹

* ✉: lea.penazzi@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Université, IUSTI UMR CNRS 7343

² LAPLACE, UMR CNRS 5213, Université Paul Sabatier

³ Méso-Star

⁴ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal UMR CNRS 6602

⁵ Centre de Recherches sur la Cognition Animale (CRCA), Centre de Biologie Intégrative (CBI)

⁶ Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR 5008

Mots clés : méthode des radiosités; méthode de Monte Carlo; image de rendu; thermographie infrarouge; méthodes inverses

Résumé :

La démarche de « rendu inverse » consiste à associer une image infrarouge expérimentale à une image modélisée (jumelle numérique ou « rendu infrarouge ») dans le but de résoudre différents problèmes inverses de mesure. Avec cette démarche, l'identification de températures et/ou d'émissivités d'objets réels est considérée comme un problème de minimisation entre une grandeur observable expérimentale (luminances sur une liste de pixels d'intérêt) et son homologue modélisé et paramétré. Elle peut permettre d'améliorer l'interprétation d'images infrarouges de scènes complexes (polluées par des réflexions multiples par exemple).

Après des travaux précédents validant la démarche sur des scènes diffuses créées numériquement, nous la confrontons ici à des images infrarouges réelles d'une scène radiative contrôlée, favorisant la présence de réflexions diffuses (toy-model avec surfaces métalliques sablées).

Le problème inverse étant résolu par une méthode de type « descente de gradient », elle fait appel au calcul des dérivées des images par rapport aux différents paramètres de la scène (température ou émissivités). Ces dérivées appelées « sensibilités » sont elles-mêmes obtenues par calcul de rendus. Nous présenterons ici deux approches pour ces calculs : i) méthode des radiosités 3D associées à une projection 3D->2D sur la grille de pixels d'une caméra virtuelle et ii) méthode de Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) en mode reverse (partant des pixels). La première méthode est limitée aux surfaces diffuses, la seconde pourra tenir compte à l'avenir d'indicatrices d'émission et de réflexion quelconques.

Des résultats expérimentaux seront montrés en situation i) de « thermographie inverse » (recherche de températures réelles à partir d'images infrarouges polluées par des réflexions diffuses, problème inverse linéaire) et ii) de « réflectométrie inverse » (recherche d'émissivités réelles en situation diffuse, problème inverse non linéaire nécessitant des calculs itératifs).

Développement d'une méthode de mesure de résistance thermique de contact entre 2 cylindres à partir d'excitations et de réponses de température en face avant

Thomas Lahens¹, Alain Sommier¹, Marie-Marthe Groz¹, Jean-Christophe Batsale¹

* ✉: thomas.lahens@u-bordeaux.fr

¹ 1.Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295 2.Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295

Mots clés : thermographie infrarouge, résistance thermique de contact, milieu granulaire 2D, traitement d'image espace-temps, évaluation non-destructive par méthodes thermiques

Résumé :

La mesure de résistance de contact linéique entre cylindres est utile pour caractériser de manière non-destructive l'état mécanique de câbles métalliques composites, ou même pour simuler des milieux granulaires 2D.

Nous proposons une méthode consistant à chauffer de manière non-uniforme et impulsionnelle une extrémité de l'assemblage de tubes (appelée face avant) et à analyser le champ de température transitoire par thermographie infrarouge (voir figure). On pourra supposer que l'autre extrémité de l'assemblage est infinie et que les pertes thermiques latérales sont négligeables.

La modélisation analytique des transferts avec des hypothèses simplificatrices permet de mettre au point une méthode d'estimation de la résistance de contact.

Les résultats expérimentaux obtenus permettent d'envisager des applications en milieu industriel.

Screening accéléré pour la découverte de matériaux multi-composants durables et innovants pour le stockage d'énergie

Thomas Bellouard¹, Alexandre Godin², Clément Mailhé³, Thierry Duforestel⁴, Christian Inard¹, Marie Duquesne¹

* ✉: thomas.bellouard@univ-lr.fr

¹ La Rochelle Université

² La Rochelle Univeristé

³ CNRS@CREATE Ltd.

⁴ 4ev Lab, EDF R&D

Mots clés : Thermographie infrarouge, stockage d'énergie thermique, matériaux à changement de phase, diagramme de phase

Résumé :

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés pour le stockage d'énergie thermique mais la température de fusion des MCP purs n'est souvent pas adaptée aux applications et limite leur usage. Leurs mélanges sont privilégiés, nécessitant l'établissement de diagrammes de phases pour identifier les compositions optimales. Une méthode dynamique, combinant thermographie infrarouge et traitement avancé de données est proposée pour l'analyse simultanée de microgouttes de compositions variées. Elle permet d'accélérer le criblage des systèmes multi-composants et l'identification de températures de transition adaptées à chaque application visée. L'objectif ultime de cette étude est de pouvoir revaloriser des déchets et co-produits de types huiles végétales et animales, qui sont par nature des matériaux multi-composants en raison de leur pureté dégradée, en les utilisant comme matériaux de stockage d'énergie thermique.

Thermographie infrarouge multi- et hyper-spectrale pour la mesure de hautes températures de matériaux opaques et semi-transparentes

Kamal Ennass¹, Benjamin Rémy¹, Vincent Schick¹, Johann Meulemans²

* ✉: kamalennass@gmail.com

¹ Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée

² Saint-Gobain Research Paris

Mots clés : haute température; méthodes inverses; thermographie infrarouge; thermométrie multi-spectrale; matériaux opaques; matériaux semi-transparentes

Résumé :

Dans les environnements industriels à haute température (800–1200 K), le contrôle précis de la température est essentiel pour la maîtrise des procédés et la qualité de production. Les méthodes classiques de mesure par contact, intrusives et peu fiables à ces températures, sont mal adaptées aux matériaux mobiles (fibres optiques, vitrages, bains de verre, laminoirs, céramiques, etc.) où un suivi dynamique est requis.

Les techniques sans contact, reposant sur l'émission propre du matériau, offrent une alternative prometteuse. Pourtant, leur précision est fortement limitée par la méconnaissance des propriétés optiques des matériaux, notamment l'émissivité (pour les surfaces opaques) ou l'émittance (pour les milieux semi-transparentes), ainsi que leur dépendance à la température et à la longueur d'onde.

Cette étude propose une méthode de thermographie infrarouge multi- et hyper-spectrale, couplant des mesures radiométriques à des techniques d'inversion, pour estimer la température en tenant compte des propriétés spectrales du matériau.

La première partie porte sur les matériaux opaques. Elle s'appuie sur des simulations Monte Carlo et une validation expérimentale avec une caméra infrarouge à 4 longueurs d'onde et un four à induction. Le modèle direct utilise une base de polynômes de type éléments finis P1-1D pour interpoler l'émissivité, assurant une meilleure régularisation du problème inverse. Cette approche permet d'atteindre des erreurs relatives inférieures à 5 % en régime transitoire. Des simulations hyper-spectrales à 20 longueurs d'onde montrent une réduction notable du biais systématique grâce à l'augmentation du nombre de paramètres explicatifs.

La seconde partie concerne les milieux semi-transparentes absorbants-émettants non diffusants. Pour le verre plat, les résultats numériques préliminaires utilisant une fonction de température linéaire par morceaux présentent des erreurs d'interpolation inférieures à 2,78 %, avec une incertitude globale autour de 5 %.

Application d'une aide à la décision multicritère pour la réhabilitation d'un hangar des Restos du Cœur

Lilou Quentel¹, Taim Mahmoud¹, Camille Devoulon¹, Juliane Dosba-Nave¹, Aboubakr El Hammouti¹, Ibtissem Chriaa¹, Arnaud Lapertot¹, Hichem Benzaama¹

* ✉: alapertot@estp.fr

¹ Institut de Recherche de la Construction, ESTP

Mots clés : Diagnostic énergétique ; Campagne expérimentale ; Confort thermique ; Efficacité énergétique ; Modélisation énergétique

Résumé :

Aujourd'hui, en France, le secteur du bâtiment est le plus énergivore, puisqu'il représente 44 % de l'énergie consommée [1]. Dans ce contexte, il devient pertinent de privilégier la réhabilitation du bâti existant plutôt que la construction neuve [2]. C'est dans cette optique que s'inscrit le projet de réhabilitation d'un local des Restos du Cœur, utilisé pour le stockage et la distribution de denrées alimentaires.

L'objectif de ce projet est de réaliser la réhabilitation de l'enveloppe d'un hangar des Restos du Cœur. Pour cela, une simulation thermique dynamique a été mise en œuvre afin d'évaluer la performance énergétique du bâtiment existant, en s'appuyant sur un modèle calibré à partir de données expérimentales.

La méthodologie appliquée dans cette étude repose sur plusieurs étapes. Tout d'abord, une campagne expérimentale a été menée en octobre 2024 à l'aide de portiques microclimatiques pour quantifier le confort thermique, d'une caméra infrarouge pour détecter les déperditions thermiques. Ensuite, une modélisation énergétique a été réalisée en couplant deux logiciels : Visuary, qui permet générer une modélisation 3D et estimer les coûts de rénovation et Pléiades Comfie, un outil dédié à la simulation des besoins énergétiques. Enfin, une aide à la décision a été mise en place identifier le meilleur compromis entre les économies d'énergie et le degré-heure d'inconfort.

Les résultats du diagnostic énergétique révèlent que le bâtiment présente d'importantes faiblesses, avec environ 70 % des déperditions thermiques liées à la toiture, en raison d'un manque d'isolation, et 15 % dues au simple vitrage. À partir des résultats de l'aide à la décision, un classement des travaux a été établi selon le temps de retour sur investissement, qui varie de 7 ans pour la rénovation de la toiture à 15 ans, en tenant compte des meilleures solutions identifiées pour chaque lot.

Première mesure du spectre de l'émissivité du tungstène avant et après exposition dans le tokamak WEST

Estelle Romulus¹, Jonathan Gaspar¹, Nathalie Ehret¹, Mathilde Diez², Jean-Laurent Gardarein¹, Céline Martin³

* ✉: estelle.romulus@univ-amu.fr

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

² CEA, IRFM

³ Aix Marseille Univ, CNRS, PIIM, Marseille, France

Mots clés : émissivité spectrale; banc d'essai

Résumé :

L'environnement des tokamaks tel que WEST sont des environnements extrêmes où les composants face au plasma sont soumis à de forts flux de chaleur et de particules (10 MW/m²). Il est donc nécessaire de mesurer précisément la température des composants pour éviter leur endommagement dû à l'interaction plasma - paroi. Une méthode commune en fusion est la thermographie infrarouge (IR) utilisant des caméras IR équipées de filtres étroits centrés sur une longueur d'onde du domaine IR. Cependant l'utilisation majoritaire du tungstène (W) pour les parois rend la mesure de température complexe notamment par le fait que le W présente une faible émissivité, de l'ordre de 0,1 voire moins dans le domaine infrarouge, et qu'elle évolue lors de l'exposition du W au plasma. En effet les travaux précédents portant sur la mesure d'émissivité de la partie basse du réacteur ont pu mettre en évidence cette variation en identifiant des zones d'érosion et de déposition. Les mesures in situ et ex situ, avant et après plasma ont mis en avant des évolutions propres à ces différentes zones. Les zones de fortes interactions montrent une diminution de 0,12 à 0,05, tandis que les zones de forte déposition montrent une augmentation jusqu'à 0,85. Cependant, bien que ces études apportent des éléments essentiels sur la variation de l'émissivité, celles-ci sont réalisées aux longueurs d'onde de travail des caméras IR utilisées dans le réacteur ou intégrées dans le domaine du moyen infrarouge (MWIR), c'est-à-dire entre 3 et 5 μm .

L'objectif de ce travail est d'étendre le domaine d'étude spectrale afin de montrer l'évolution de l'émissivité de composants face au plasma entre 1 et 15 μm . La première étape consiste à développer un banc d'essai de mesure FTIR pour caractériser l'émissivité spectrale (1–10 μm , jusqu'à 400 °C) de matériaux exposés aux plasmas dans les tokamaks. Les mesures ex-situ avant/après exposition seront analysées et corrélées à la structure physico-chimiques des dépôts en surface.

Bubble nucleation quantification for a single droplet impact onto a heated substrate

Álvaro Campos¹, Luigi Leita¹, Arthur Oliveira¹, Guillaume Castanet², Michel Gradeck²

* ✉: afc.araya@usp.br

¹ Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, Brazil

² LEMTA, University of Lorraine

Mots clés : Droplets; Bubble nucleation; Heat dissipation; Optical techniques

Résumé :

Spray cooling has numerous high-temperature industrial applications, including metallurgical processes and wall cooling during fuel injection. In terms of cooling effectiveness, spray systems is among the best solutions to obtain high heat transfer coefficients. However, the underlying heat transfer mechanisms remain poorly understood, and current predictive models offer limited reliability. The complexity of spray cooling arises from the interplay of multiple variables, such as fluid properties, surface characteristics, ambient conditions, and surface temperature. Although single droplet impact studies simplify the dynamics of spray behavior, they serve as a fundamental basis for understanding key phenomena such as wall rewetting and bubble nucleation. This work proposes the investigation of single droplet impacts on heated substrates using Total Internal Reflection (TIR), an optical technique that enables visualization of the solid-liquid interface. TIR facilitates the detection of interfacial singularities such as dry-out zones and nucleation sites where heat flux variations are most pronounced. To quantify the effective solid-liquid contact area during droplet impact in the nucleate boiling regime, a bubble detection algorithm is under development. A major challenge in this context is the presence of light reflections and interference patterns, which can mimic the appearance of bubbles due to their similar shapes and pixel intensities. To mitigate this issue, the algorithm incorporates segmentation criteria such as bubble size and circularity, which significantly improve detection accuracy, particularly during the early spreading stage, when a large number of small bubbles rapidly form at the interface. Further improvements, including the integration of additional segmentation parameters and a comprehensive sensitivity analysis, are being considered to enhance the algorithm's robustness and reliability.

Thème 10

Transferts en Milieux Hétérogènes

Analysis of heat and mass transport in a complex PDMS-based porous medium	198
Modélisation du déclenchement de l'ébullition nucléée en convection forcée en régimes permanent et transitoire	199
Impact of internal flow on particle deposition in a locally heated sessile droplet	200
Élaboration et caractérisation des propriétés thermiques d'un matériau à gradient de propriétés céramique/métal	201
Performance d'extinction incendie d'un brouillard d'eau additivée aux alcools primaires linéaires : une analyse statistique	202
De la microstructure à la conductivité thermique dans des céramiques UO ₂ , par une technique mathématique originale	203
Caractérisation radiative d'un milieu fibreux par étude morphologique de l'empilement des cylindres le constituant et méthode Monte Carlo	204
Simulation des transferts thermiques par la méthode des cellules coupées	205
Analyse comparée de méthodes de résolution du couplage conduction-rayonnement dans des matériaux hétérogènes semi-transparents	206
Caractérisation de la qualité de l'interface thermosoudée entre deux composites thermoplastiques	207
Développement d'un protocole expérimental multi-échelles pour la quantification de l'évapotranspiration réelle en milieu urbain végétalisé	208

Analysis of heat and mass transport in a complex PDMS-based porous medium

Emil Grigorov¹, Yann Jobic¹, Frédéric Topin¹

* ✉: emil.GRIGOROV@univ-amu.fr

¹ Aix marseille université, IUSTI (UMR 7343)

Mots clés : dispersion, conductivity, porous media, heat- and mass transport

Résumé :

Effective thermal conductivity of flows in porous media is one of the most fundamental properties required for industrial applications such as combustion, heat exchange or enhanced novel oil recovery techniques. Its estimation is not an easy task since thermal dispersion must be considered accurately. In this study, we determine numerically the thermal dispersion of a fluid flow within a polydimethylsiloxane (PDMS) porous medium at different Reynolds and Péclet numbers. The geometry is created by casting the polymer onto a sugar cube replacing its crystalline structure in negative. A three-dimensional model is then reconstructed using microtomography images, enabling the characterization of the main geometric properties of the fluid and solid phases. Two configurations are tested: in the first one, temperature gradient is introduced along the longitudinal direction of the flow, while in the second, the gradient is perpendicular to the flow. The microscopic flow and temperature fields obtained for both cases are subsequently used to evaluate the effective thermal conductivity of the utilized porous medium, considering the physical solid (polymer) to fluid (water) phase conductivity ratio (λ_s/λ_f). The simulations examine velocity fields, pressure drop and shear rates along the PDMS sponge, comparing them to a Kelvin cell geometry with well-characterized properties and transport mechanisms. Additionally, we investigate the effect of compressing the pores of the PDMS sponge on its thermal properties, highlighting the influence of structural deformation on heat transfer. In the last part we investigate how these findings related to the heat transport can affect the mass transport, examining the influence of thermal effects on the mixing process of two miscible fluids within the PDMS structure. The study offers thus also insights into the interplay between thermal and mixing processes in complex porous media.

Modélisation du déclenchement de l'ébullition nucléée en convection forcée en régimes permanent et transitoire

Héloïse Hénaff¹, Jean-Marc Labit², Marie-Christine Duluc³, Cassiano Tecchio²

* ✉: heloise.henaff@cea.fr

¹ Conservatoire National des Arts et Métiers, CEA Saclay

² CEA Saclay

³ Conservatoire National des Arts et Métiers

Mots clés : Transitoire de puissance ; Déclenchement de l'ébullition nucléée ; Convection forcée

Résumé :

Dans le domaine de la sûreté nucléaire, le RIA (Reactivity Initiated Accident) est un scénario accidentel, déclenché par une insertion de réactivité dans le cœur du réacteur, qui entraîne une augmentation exponentielle de la puissance neutronique. En conséquence, la température combustible augmente très rapidement. L'évolution du transfert thermique entre le combustible et le fluide de refroidissement est déterminante pour l'issue du transitoire.

La rapidité du transitoire modifie la physique des transferts thermiques. On observe notamment un retard au déclenchement de l'ébullition nucléée (ONB, Onset of Nucleate Boiling), d'autant plus important que le temps caractéristique du transitoire est court. Ce retard a une influence significative sur la suite de l'accident, car le refroidissement du cœur est beaucoup plus efficace en ébullition nucléée qu'en monophasique.

La présente étude regroupe un grand nombre de courbes d'ébullition expérimentales en convection forcée, en régimes transitoire et permanent. Le but est d'en tirer une nouvelle modélisation de l'ONB sur une large plage de conditions expérimentales.

Le modèle développé part d'une définition de l'ONB basée sur la modification du transfert thermique par rapport au régime monophasique. Il prend en compte l'état de paroi comme paramètre déterminant pour l'ébullition. Pour ce faire, une distribution statistique des tailles de sites en paroi est considérée. La température d'activation des sites est tirée de modèles analytiques de la littérature. Ce modèle est innovant dans la mesure où il permet d'étudier l'ONB de manière globale et moyennée sur la surface, mais à partir de considérations microscopiques analytiques.

Après traitement des données expérimentales, le modèle est élaboré en veillant à garder une approche analytique. Ce modèle est ensuite comparé à la base de validation pour déterminer sa pertinence, en quantifiant l'erreur de prédiction, et en comparant ses performances à celles des modèles existants.

Impact of internal flow on particle deposition in a locally heated sessile droplet

Mebrouk Ait Saada¹, Salah Chikh¹, Lounès Tadrist²

* ✉: m_aitsaada@yahoo.fr

¹ USTHB

² Aix-Marseille Université, CNRS, Laboratoire IUSTI, UMR 7343

Mots clés : Sessile droplet; evaporation, flow pattern; interfaces; heat and mass transfer; particle deposition

Résumé :

A numerical investigation is conducted to study the influence of internal flow on particle deposition patterns in an evaporating sessile droplet. The colloidal suspension droplet evaporates in a pinned mode on an adiabatic solid surface with the wetting zone subjected to localized isothermal heating. The numerical model incorporates the effects of buoyancy, evaporative cooling, and surface tension gradients. The results reveal that internal flow within the droplet significantly influences particle transport and deposition. For a fully adiabatic wetting surface, a clockwise unicellular flow, combined with an outward radial flow at low contact angles, leads to ring-shaped particle deposition. Conversely, for a fully isothermal wetting surface, a counterclockwise unicellular flow during evaporation results in a central bump-shaped particle deposition. When the droplet is locally heated at the periphery of its base, strong flow near the contact line transports some particles to the droplet edge, forming a ring, while the remaining particles circulate within the droplet core, producing a central bump. However, when the droplet is locally heated at the center of its base, the ring at the edge nearly disappears and the central bump becomes more extended and thinner compared to the fully isothermal case.

Élaboration et caractérisation des propriétés thermiques d'un matériau à gradient de propriétés céramique/métal

Baraa Saidani¹, Julie Cedelle², Damien Bregiroux³, Johann Petit¹, Jihed Zghal⁴, Isabelle Bruant¹

* ✉: julie.cedelle@parisnanterre.fr

¹ Laboratoire LEME

² Laboratoire LEME - Université Paris Nanterre

³ LCMCP - Sorbonne Université

⁴ laboratoire LEME

Mots clés : propriétés thermiques; modélisation; FGM; coefficient dilatation; conductivité thermique; frittage

Résumé :

Durant ces dernières années, une nouvelle génération de matériaux composites, les matériaux à gradient de fonction (Functionally Graded Materials, FGM), a émergé. Initialement développés pour résoudre des problèmes thermiques dans des applications aérospatiales, les FGM présentent un gradient de propriétés évoluant de manière continue dans une ou plusieurs directions. Cette structure permet d'associer deux matériaux, typiquement une céramique et un métal, avec une transition progressive et sans discontinuité, assurant ainsi des propriétés complémentaires. Ces matériaux sont particulièrement avantageux dans les environnements extrêmes, où ils améliorent la durabilité et l'efficacité des composants soumis à des conditions thermiques et mécaniques sévères.

Dans ce cadre, l'étude porte sur l'évolution des propriétés thermiques d'un FGM Ni/BaTiO₃, conçu pour une transition continue de 100 % métal Ni à 100 % céramique BaTiO₃.

Des échantillons cylindriques multicouches ont été élaborés par frittage par plasma (SPS), offrant une distribution progressive de la composition. Pour caractériser ce gradient, des mesures de conductivité thermique et de coefficient de dilatation ont été réalisées tout au long de l'épaisseur du matériau. L'analyse des résultats permet d'identifier une loi de puissance pour modéliser la variation des différentes propriétés des FGPM selon la direction du gradient.

Ces résultats contribuent à améliorer la précision des simulations et des modèles numériques et ouvrent de nouvelles perspectives pour la conception de matériaux à gradient fonctionnel, notamment pour des applications nécessitant un contrôle précis des propriétés thermiques.

Performance d'extinction incendie d'un brouillard d'eau additivée aux alcools primaires linéaires : une analyse statistique

Antonin Robinet¹, Ilyas Sellami¹, Khaled Chetehouna¹, Ludovic Lamoot¹

* ✉: antonin.robinet@insa-cvl.fr

¹ INSA Centre-Val de Loire

Mots clés : Feu de nappe;brouillard d'eau additivée;alcools primaires linéaires;analyse de la variance

Résumé :

Le brouillard est un système automatique d'extinction incendie qui a démontré son potentiel pour de nombreuses applications. Il pourrait constituer une alternative aux systèmes à gaz actuellement employés pour la protection de compartiments moteur de véhicules terrestres. La protection incendie de ces espaces confinés contraint sévèrement le système brouillard d'eau en matière de volume d'eau embarqué et de débit d'injection. La performance du brouillard d'eau peut être améliorée grâce à l'ajout d'additifs en solution. Ces additifs représentent toute espèce étant ajoutée à la pulvérisation, indépendamment du critère de solubilité dans l'eau. Ces additifs permettent d'attaquer davantage de classes de feux comme les feux de graisses ou les feux de gaz, de diminuer le diamètre médian des gouttes ou encore briser la réaction en chaîne de combustion. Une revue exhaustive de la littérature a mis en évidence l'existence des solvants comme additifs. Paradoxalement, ces composés inflammables ont montré leur efficacité sur le temps d'extinction en tant qu'additifs pour le brouillard d'eau. Dans cette étude, sept alcools primaires linéaires, du méthanol à l'1-heptanol, ont été utilisés comme additifs dans des concentrations allant de 0,6 % à 20 % pour une application d'extinction d'un feu de nappe par brouillard d'eau. Les résultats de temps d'extinction ont par la suite été traités statistiquement pour déterminer une dépendance du temps d'extinction au type d'additif ou à la concentration et si les différences de temps d'extinction entre type d'alcool sont significatives. La dépendance des variables a été traitée grâce aux tests du χ^2 et de Fisher que l'analyse de la variance a été menée grâce au test de Kruskal-Wallis. Enfin, un modèle prédictif du temps d'extinction a pu être développé à partir du taux de refroidissement enregistré et des propriétés de Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) et de Température d'Auto-Inflammation (TAI) des alcools.

De la microstructure à la conductivité thermique dans des céramiques UO₂, par une technique mathématique originale

Etienne Delobre¹, Renaud Masson¹, Marc Josien¹, Michel Bornert²

* ✉: etienne.delobre@cea.fr

¹ CEA/DES/IRESNE/DEC

² Laboratoire Navier, Ecole des ponts, Univ. Gustave Eiffel, CNRS

Mots clés : Homogénéisation; Fraction rationnelle; Loi semi-analytique

Résumé :

L'évolution de la conductivité thermique des céramiques d'UO₂, utilisées comme combustibles des réacteurs nucléaires, fait l'objet de nombreuses études. La porosité joue un rôle prépondérant sur son comportement sous irradiation. Le combustible étudié ici est doté d'une distribution de porosités sphériques à petite échelle et d'un réseau poreux interconnecté à une échelle plus grande.

Des travaux précédents (J. Meynard et L. Moutin) ont permis de développer un modèle de conductivité thermique pour ce combustible qui s'appuie sur une modélisation morphologique 3D du réseau poreux. Puis, des simulations à champ complet de la réponse thermique de ces microstructures virtuelles donnent la conductivité effective. Largement validé par comparaison à des mesures expérimentales, le modèle demeure lourd et inutilisable dans des simulations aux échelles supérieures. Une loi semi-analytique basée sur les résultats de ce modèle est requise.

Les travaux de D. J. Bergman montrent que la conductivité effective peut être approchée par une fraction rationnelle, fonction de la morphologie du réseau poreux et du rapport des conductivités thermiques des deux phases, appelé contraste. Ces deux paramètres étant indépendants, une fois les coefficients relatifs à la microstructure déterminés — les pôles et les résidus de la fraction rationnelle —, la conductivité effective peut être calculée pour tout contraste.

D. Zhang et E. Cherkaev proposent d'approcher cette fraction rationnelle par des approximants de Padé. Ici, nous utilisons la représentation barycentrique pour approcher la conductivité effective par une fraction rationnelle. Un processus d'optimisation (algorithme AAA) donne les pôles et résidus à partir d'une dizaine de couples contraste/conductivité issus de simulation FFT. La loi obtenue et sa dérivée sont comparées à de nouveaux points issus de simulations, montrant une prédiction remarquable sur une large plage de contraste (1e-4 à 100).

Caractérisation radiative d'un milieu fibreux par étude morphologique de l'empilement des cylindres le constituant et méthode Monte Carlo

Mahé Souveton¹, Vital Le Dez¹, Franck Enguehard¹

* ✉: mahe.souveton@univ-poitiers.fr

¹ Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA

Mots clés : Transfert radiatif, milieu fibreux, méthode Monte Carlo, morphologie, milieu non Beerien

Résumé :

L'isolation thermique à haute température repose la plupart du temps sur des matériaux très poreux constitués de fibres ou de particules de faibles dimensions spatiales. Dans ces matériaux, le transfert radiatif joue un rôle fondamental qu'il faut pouvoir caractériser à toute échelle.

Dans ce travail, nous étudions un milieu fibreux réel assimilé à un empilement de cylindres infinis et interpénétrables sous vide, dont la phase fibreuse peut être approchée par un milieu semi-transparent froid dense, absorbant et non diffusant, caractérisé par un indice de réfraction monochromatique complexe. La morphologie du système est rendue statistiquement homogène et isotrope en termes de porosité et d'orientation des fibres à l'aide d'un processus de Poisson lorsque les axes des cylindres suivent une distribution μ -aléatoire. Les expressions de la porosité moyenne et du taux d'interpénétration s'en déduisent alors analytiquement, ainsi que les fonctions de corrélation des phases.

La détermination des propriétés radiatives du milieu homogène équivalent s'obtient par inversion des résultats de transmittivités et réflectivités lorsqu'une face de la boîte de calcul est soumise à un rayonnement incident de type hémisphérique ou collimaté. Le calcul des transmittivités et réflectivités est effectué par une méthode de Monte Carlo en tirs balistiques de photons appliquée sur le système poreux fibreux. L'inversion repose sur un modèle de mur plan absorbant-diffusant équivalent avec fonction de phase simple.

La détermination des propriétés radiatives du système fibreux sous forme de paramètres scalaires suggère plutôt un caractère non Beerien du milieu. Ainsi, la recherche de la fonction de distribution cumulée d'extinction et de la fonction de phase de diffusion généralisée, déterminées par voie numérique à l'aide de la méthode de Monte Carlo, semble très prometteuse ; à ce jour il ne semble pas exister de forme analytique exacte pour ces fonctions.

Simulation des transferts thermiques par la méthode des cellules coupées

Dorian Dupuy¹, Adrien Toutant², Antoine Du Cluzeau¹, Guillaume Bois¹

* ✉: dorian.dupuy@cea.fr

¹ Université Paris-Saclay, CEA, Service de Thermo-hydraulique et de Mécanique des Fluides (STMF)

² PROMES-CNRS, Université de Perpignan Via Domitia

Mots clés : simulation numérique ; méthode des cellules coupées ; écoulement diphasiques.

Résumé :

La simulation directe des transferts de chaleur dans un écoulement diphasique dispersé, avec une résolution explicite de l'interface, peut être réalisée sur une grille fixe non-conforme ou sur un maillage dynamique se conformant à l'interface entre les phases. La méthode des cellules coupées combine des aspects de ces deux approches, en coupant les cellules d'une grille fixe au niveau de l'interface. Elle permet, en utilisant une discrétisation en volume finis, d'imposer strictement les lois de conservation et de prescrire le couplage entre les phases explicitement par une condition aux limites. Cette communication développe une méthode des cellules coupées pour la simulation des transferts de chaleur dans un écoulement diphasique. L'interface est représentée explicitement à l'aide de marqueurs lagrangiens connectés. L'intersection entre l'interface et la grille fixe, cartésienne, est géométriquement bien définie. Les cellules coupées résultantes varient en volume, apparaissent et disparaissent suivant le mouvement de l'interface. La stabilité numérique est assurée dans les petites cellules sans restriction du pas de temps, avec un schéma en temps explicite, grâce à une stratégie de redistribution des flux. La méthode numérique est comparée à une méthode mono-fluide purement cartésienne pour la convection-diffusion de la chaleur autour d'une particule sphérique en mouvement et échangeant avec le fluide environnant. On étudie en particulier l'effet du schéma d'avancement temporel, et une méthode originale est développée pour adapter les méthodes Runge-Kutta au cas des cellules coupées. La méthode des cellules coupées est stable pour des pas de temps de simulation plus élevés que la méthode mono-fluide de référence. Une intégration temporelle semi-implicite des surfaces associées aux flux numériques, qui évoluent rapidement avec le déplacement de l'interface, permet d'améliorer la précision de la simulation.

Analyse comparée de méthodes de résolution du couplage conduction-rayonnement dans des matériaux hétérogènes semi-transparents

Léa Penazzi¹, Mohd Afeef Badri², Stéphane Blanco³, Cyril Caliot⁴, Sylvain Chupin⁵, Cyril Daoût⁵, Jérémie Dauchet⁶, Simon Eibner⁷, Mouna El Hafi⁷, Franck Enguehard⁸, Vincent Eymet⁹, Olivier Farges¹⁰, Yann Favennec¹¹, Alexandra Adjovi Fortunat⁷, Richard Fournier³, Dominique Jehl¹², Pierre Jolivet¹³, Fabrice Rigollet¹, Denis Rochais⁵, Benoît Rousseau¹¹

* ✉: lea.penazzi@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Université, IUSTI

² CEA, SGLS, Université Paris-Saclay

³ LaPlACE, Université Paul Sabatier

⁴ LMAP, UPPA

⁵ CEA, DAM

⁶ Univ. Clermont Auvergne, INP, Institut Pascal

⁷ RAPSODEE, IMT Mines Albi

⁸ Institut Pprime

⁹ Méso-Star

¹⁰ Université de Lorraine, LEMTA

¹¹ LTeN, Nantes Université

¹² ArianeGroup

¹³ LIP6, Sorbonne Université

Mots clés : conduction ; rayonnement ; méthodes déterministes ; méthodes stochastiques ; matériau hétérogène

Résumé :

Six équipes du GDR CNRS 2047 TAMARYS collaborent autour d'un exercice inédit d'analyse comparée de méthodes de résolution numérique du couplage conduction-rayonnement à l'échelle locale au sein d'un matériau hétérogène de type gyroïde, issu de la famille des TPMS. L'objectif principal de cet article est de faire état des résultats issus des différentes méthodes en utilisant une base commune : un modèle thermique commun, des fichiers de description du maillage partagés, le même jeu de propriétés thermo-physiques et des conditions aux limites identiques. Les observables comparées sont les profils de température et de flux de chaleur. Une première étape décisive a été franchie : toutes les équipes disposent désormais d'un workflow partagé et fonctionnel pour générer et exploiter leur propre structure à partir d'une géométrie tri-dimensionnelle commune. Ce résultat, fruit d'un an de collaboration, marque une avancée significative dans l'organisation inter-équipes et la validation des outils numériques. Cette première comparaison des résultats des différents solveurs est prometteuse car elle permettra de mettre en lumière la diversité de ces méthodes et de leur offrir une « inter-validation ». En effet, cet exercice rassemble des méthodes déterministes et stochastiques, ayant recours à des maillages surfaciques ou volumiques, à travers des couplages faibles et forts, autour d'une configuration commune. Ce projet de recherche illustre la richesse des savoir-faire présents au sein des équipes du GDR et ouvre des perspectives inédites sur des comparaisons qualitatives et peut-être quantitatives entre toutes ces méthodes. Les prochaines étapes incluent l'ajout de configurations supplémentaires (autres critères morphologiques et texturaux, semi transparence de la phase solide), un approfondissement de l'analyse (besoins informatiques et temps de calcul), une ouverture potentielle à d'autres équipes du GDR et à terme l'estimation de propriétés thermiques apparentes.

Caractérisation de la qualité de l'interface thermosoudée entre deux composites thermoplastiques

Pierre Waroquier¹, Arthur Lévy², Steven Le Corre², Jean-Luc Bailleul²

* ✉: jean-luc.bailleul@univ-nantes.fr

¹ Nantes Université - LTeN - UMRCNRS6607 - IRT Jules Verne

² Nantes Université - LTeN - UMR CNRS 6607

Mots clés : Thermosoudage; Caractérisation; Adhésion; Composite thermoplastiques

Résumé :

L'utilisation des matériaux composites, à fortes propriétés intrinsèques, est déjà reconnue dans le cadre de l'allègement des structures. Cependant, le développement de matrices thermoplastiques hautes performance ouvre un nouveau champ d'investigation : le thermosoudage de composite.

Dans ce contexte, un banc thermo-contrôlé a été développé. Il permet de réaliser des essais de soudage en conditions contrôlées proches de celles observées dans l'industrie : température d'interface jusqu'à 400°C, pression jusqu'à 30 bar, temps de maintien de la pression pouvant descendre à 0.1s. Les vitesses de refroidissement aux interfaces soudées peuvent atteindre 40K/s, ce qui permet de figer le matériau en passant rapidement sous sa température de transition vitreuse.

A ce jour, la caractérisation mécanique des interfaces ainsi soudées est réalisée en conditions isothermes, ce qui a permis de développer des modèles de cinétiques d'adhésion piezo et thermo-dépendants. Un nouveau banc a été développé nous permet de réaliser des expériences en mode anisotherme qui sont plus représentatives des procédés de surmoulage. Les premiers résultats obtenus seront alors présentés et analysés.

Développement d'un protocole expérimental multi-échelles pour la quantification de l'évapotranspiration réelle en milieu urbain végétalisé

Hajar Benhmidou¹, Thomas Fasquelle¹, Jean-Philippe Mevy²

* ✉: hajarbenhmidou@hotmail.fr

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

² Aix Marseille Université, Avignon Université, CNRS, IRD, IMBE, Marseille, 13331, France

Mots clés : Évapotranspiration (ET) ; Végétalisation urbaine ; Bilan énergétique de surface ; Thermographie infrarouge ; Adaptation climatique.

Résumé :

L'évapotranspiration (ET) est un processus clé dans le fonctionnement hydrique et thermique des milieux urbains végétalisés et contribue à la régulation de leur microclimat. Toutefois, sa quantification reste difficile en contexte urbain, en raison de la grande variabilité des surfaces, des espèces végétales et des interactions sol-plante-atmosphère.

Dans le cadre du projet ETUVE, un protocole expérimental multi-échelles est en cours de développement, visant à mesurer l'ET réelle à différentes échelles spatiales (plante, arbre..) et temporelles (horaire à saisonnière). Ce protocole s'appuie sur quatre approches complémentaires : (1) la mesure continue de flux de sève à l'aide de capteurs TDP30 pour estimer la transpiration des arbres ; (2) les mesures ponctuelles des échanges gazeux foliaires à l'aide de l'analyseur de gaz CIRAS 4; (3) le bilan énergétique de surface, intégrant les conditions météorologiques, le rayonnement net (CNR4), et la thermographie infrarouge (FLIR E96) pour estimer l'évapotranspiration à partir des flux d'énergie en surface; (4) l'approche des trois températures, incluant la mesure de radiation nette (CNR4), les températures de surface et de l'air autour du couvert végétal urbain,

pour estimer l'ET via les gradients thermiques indiquant l'évaporation active. Les expérimentations sont menées sur plusieurs sites urbains (jardin botanique universitaire, espaces verts publics), mais aussi dans des chambres climatiques contrôlées, afin de reproduire différentes conditions environnementales et isoler certains facteurs clés.

Les données collectées permettront d'évaluer la pertinence des modèles classiques (comme Penman-Monteith) et de mieux comprendre les facteurs de contrôle de l'ET urbaine. Ces résultats visent à améliorer la modélisation des flux hydriques et énergétiques et à soutenir le développement de solutions fondées sur la nature pour l'adaptation climatique des villes.

Liste des auteurs

A

Aatik, Manal	30
Ababsa, Abdelbassat	128
Abdulhay, Bakri	181
Aboulfalah, Houda	58
Ach-Chakhar, Manal	147
Adelard, Laetitia	153
Adihou, Wilfrid	50, 179
Agbelele, Koffi Judicaël	162
Ahachad, Mohammed	15
Ait Moula, Soumaya	49
Ait Saada, Mebrouk	200
Akotegnou, Dieu-Donné	179
Albin, Eric	42
Allam, Hamza	160
Allanic, Nadine	129
Altamirano, Amín	115
Amiot, Baptiste	109
Amoud, Oussama	57
Anxionnaz-Minvielle, Zoé	157
Aouali, Abderezak	65
Apaolaza-Pagoaga, Xabier	26
Arenas-Leurent, Maxime	175
Atchade, Luc A.	179
Atli, Atilla	173
Atmani, Lamiae	130
Audoly, Vincent	29
Azam, Marie-Hélène	144, 175

B

Badet-Rialhe, Martin	45
Badia, Ayoub	84
Badri, Mohd Afeef	206
Bahrani, S. Amir	97
Bailleul, Jean-Luc ...	131, 152, 164, 169, 207
Bailly, Yannick	105
Bajji, Said	145
Bal-Fontaine, Simon	183
Balli, Mohamed	49
Barakat, Israa	42
Barbosa, Séverine	26
Baris, Bulent	30

Barka, Brahim	158
Barrettapiana, Dorian	123
Bascaules, Julie	153
Basset, Simon	170
Bataille, Françoise	67
Batsale, Jean-Christophe	191
Battaglia, Jean-Luc	122, 124, 127, 189
Baucour, Philippe	53, 61, 107
Baudin, Nicolas	165, 177
Bellettre, Jérôme	165
Bellouard, Thomas	192
Benhmidou, Hajar	208
Ben Jabrallah, Sadok	79
Ben Khalifa, Ghada	18
Benoit, Alexandre	36
Ben Radhia, Rym	79
Ben Taher, Mohamed Amine	30
Bentivoglio, Fabrice	96
Benzaama, Hichem	194
Berger, Julien	120, 174
Berlioux, Baptiste	109
Berrah, Lamia	13, 28, 36
Berro, Mohammad Jawad	152
Bettinelli, Mickaël	36
Biegler, Lorenz T.	112
Bigot, Barbara	110
Blanco, Stéphane	70, 91, 190, 206
Bliard, Christophe	153
Blyweert, Pauline	172
Bois, Guillaume	205
Bois, Mathilde	170
Boiteau, Mathis	111
Bompas, Jérémy	102
Bonhomme, Marion	144
Bonnet, Dimitri	107
Bornert, Michel	203
Bouda, Alphonse	140
Bougeard, Daniel	34, 104
Bourges, Coline	125
Bouvenot, Jean-Baptiste	6, 7, 151
Bouvier, Pascale	104
Bozonnet, Emmanuel	141

Brahami, Yacine	35, 59
Bregiroux, Damien	201
Breteau, Antoine	141
Briclot, Alexandre	100
Brisse, Aurélien	62
Brissot, Charles	84
Bruant, Isabelle	201
Bruch, Arnaud	96, 180
Brunetto, Gaetan	70
Burgers, Ida	122
Buttay, Cyril	51

C

Caballina, Ophélie	188
Caillet, Hélène	62, 153
Caliot, Cyril	206
Campos, Álvaro	196
Camus, Théophile	80
Caney, Nadia	20
Cangemi, Laurent	90
Cao, Pengfei	176
Caous, Jean-Marie	141
Carbonneau, Nathan	87
Caron, Simon	48
Carré, Charles	97
Castanet, Guillaume	92, 98, 188, 196
Castro-Gutiérrez, Jimena	172
Cedelle, Julie	201
Celzard, Alain	172
Chamagne, Didier	61, 107
Chamoun, Saba	83
Champel, Bénédicte	80, 170
Changizi, Farzaneh	19
Charles, Michaël	64
Chassain, Clément	124
Chen, Ziyuan	86
Cherry, Léa	67
Chetehouna, Khaled	86, 202
Chevalier, Stéphane	74, 127
Chevrel, Serge	184
Chikh, Salah	200
Chorak, Aicha	15
Chriaa, Ibtissem	194
Chupin, Sylvain	206
Cioulachtjian, Serge	167
Cisse, El Hadji Abdoul Aziz	154
Clausse, Marc	39, 54
Clavier, Rémi	110
Cloet, David	126
Colinart, Thibaut	43, 60, 134, 155
Collignon, Romain	31
Corgier, David	36
Cornuault, Pierre-Henri	61

Cosson, Lionel	156
Courtois, Elodie	130
Coustet, Christophe	190
Crouau, Florian	127
Crugnale, David	62
Cutard, Thierry	184

D

Daho, Tizane	114, 140
Daniel, Céline	115
Daoud, Jean	165
Daoût, Cyril	206
Da Silva, David	33
Dauchet, Jérémie	190, 206
Daurenjou, Vincent	82
Dedion, Camille	14
Delaplace, Guillaume	157
De Larochelambert, Thierry	10, 105
Delasse, Chaimaa	144
De La Vauvre, Augustin	90
Delhote, Nicolas	64
Delobre, Etienne	203
Demasles, Hélène	31
De Melo Antunes, Mariana	122
De Paepe, Ward	27, 102
Desaleux, Thibault	110
Devoulon, Camille	194
De Wilde, Yannick	73
Dias Tavares, Junior	161
Diez, Mathilde	195
Djermoune, Asma	94
Djossou, Ayihaou Armand	162, 179
Dosba-Nave, Juliane	194
Draoui, Abdeslam	147
Du Cluzeau, Antoine	205
Duforestel, Thierry	192
Dujardin, Nicolas	153
Duluc, Marie-Christine	199
Dumain, Antoine	98
Dumont, Antoine	46
Dumontaud, William	174
Dumoulin, Pierre	37
Dupleix, Anna	132, 156, 171
Dupuy, Arthur	79
Dupuy, Dorian	205
Duquesne, Marie	192
Duvaut, Thierry	64

E

Ehret, Nathalie	190, 195
Eibner, Simon	91, 206
El Assaad, Machhour	155
El Hafi, Mouna	91, 206

El Hammouti, Aboubakr	194
El Helou, Patrick	44
El Idi, Mohamed Moussa	173
El Khoury, Laurice	160
El Mrabet, Safae	52
El Rassy, Elissa	131, 181
Enguehard, Franck	204, 206
Ennass, Kamal	193
Eymet, Vincent	190, 206

F

Fabiani, Titouan	37
Falcoz, Quentin	57
Fan, Yilin	177
Farges, Olivier	206
Farrusseng, David	115
Fasquelle, Thomas	26, 208
Faugeroux, Olivier	57
Favennec, Yann	90, 206
Feullet, Vincent	101, 119
Feldheim, Véronique	34, 46
Feng, Lique	43
Fénot, Matthieu	81, 93
Ferjani, Néjia	62
Ferrand, Martin	109
Ferry, Apolline	28
Feullet, Vincent	161
Fierro, Vanessa	172
Figueiredo Pereira Da Silva Jr., Cristiano Henrique	123
Filaine, Frédéric	176
Fillet, Romain	172
Fitó-De-La-Cruz, Jaume	13, 36
Flamant, Gilles	67
Fohanno, Stéphane	83
Fois, Magali	158
Forest, Vincent	190
Fortunat, Adjovi Alexandra	91, 206
Fossa, Marco	38
Fournier, Richard	70, 91, 206
Fraigneau, Yann	87
Fraisse, Gilles	126
François, Adrien	73
Frezzato, David	100
Fuentes, Adrien	43, 44, 60

G

Gaillard, Léo	65
Ganswindt, Astrid	13, 33
Garcia, Pierre	39, 54
Gardarein, Jean-Laurent	135, 195
Gasparin, Suelen	120
Gaspar, Jonathan	135, 190, 195

Gaunand, Clémence	73
Gautier, Robin	113
Gautrais, Jacques	190
Gavan, Valentin	33
Gavignet, Eric	61
Gbegbo, Crédo Aimé Ange-Marie Mahugnon	162
Geffroy, Pierre-Marie	65
Gehl, Damien	163
Geslain, Edouard	66, 125
Ginestet, Stéphane	144
Giraud, Florine	11, 36, 85, 98
Girault, Manuel	93, 132
Giroux-Julien, Stephanie	148
Glantz, Tony	185
Glouannec, Patrick	44
Godin, Alexandre	192
Gradeck, Michel	94, 170, 185, 196
Granier, Julien	184
Graur, Irina	75
Grigorova-Moutiers, Veneta	73
Grigorov, Emil	75, 198
Grosjean, Baptiste	14
Grosu, Lavinia	79
Groz, Marie-Marthe	191
Guernouti, Sihem	13, 33, 147
Guidi, Clotilde T.	179
Guo, Xiaofeng	176

H

Hajjar, Ahmad	173
Hamadi, Alaa	30
Hamdaoui, Ons	160
Hamieh, Moussa	181
Hema, Césaire	140, 146
Hénaff, Héloïse	199
Henriot, Baptiste	64
Henry, Jean-François	128
Honahonde, Gérard	50
Horny, Nicolas	71
Houngan, Comlan Aristide	162, 179

I

Ibos, Laurent ...	101, 119, 153, 160, 161, 163
Ignatius, Igin Benny	17
Inard, Christian	192
Ismail, Ali	105

J

Jadal, Mariam	49
Janod, Titouan	59
Jay, Arnaud	183
Jehl, Dominique	206

Jobic, Yann	198
Jolivet, Pierre	206
Joly, Frédéric	133
Jonckheere, Brice	107
Josien, Marc	203
Joulain, Karl	73
Jullien, Delphine	132, 156, 171
Junior, Osman	13

K

Kadoch, Benjamin	26, 174
Kafeh, Doha	55
Karkri, Mustapha	173
Kasraoui, Taissir	178
Kastendeuch, Pierre	144
Kazeoui, Habiba	166
Kharchi, Nadia	158
Knikker, Ronnie	109
Korsaga, Armand	114
Krachmalnicoff, Valentina	73
Kraiem, Manel	173
Kusiak, Andrzej	124, 189

L

Labat, Matthieu	144
Labergue, Alexandre	92, 185
Labit, Jean-Marc	199
Lacassagne, Tom	97
Lahens, Thomas	191
Laknizi, Azzeddine	15
Lamaison, Nicolas	39, 41, 54
Lamoot, Ludovic	86, 202
Lamy, Herve	163
Lanzetta, François	53
Lapertot, Arnaud	40, 194
Largiller, Grégory	168
Lasserre, Capucine	31, 39, 54
Launay, Julien	129
Lavalette, Anne	132, 156, 171
Lavieille, Pascal	14, 70
Le Berre, Rémi	109
Le Bideau, Pascal	44, 130
Leclef, Laurence	11
Lecoanet, Alexandre	94
Lecompte, Thibaut	155
Leconte, Antoine	47
Le Corre, Steven	108, 164, 207
Le Dez, Vital	204
Lefèvre, Frédéric	167
Le Gal La Salle, Eric	152
Le Gall, Guillaume F.J.	106
Le Guern, Théau	56
Leitao, Luigi	196

Lekombo, Claude Sara	24
Le Maout, Yannick	184
Le Masson, Philippe	125
Lemelle, Anne-Geneviève	41
Lemonnier, Thomas	51
Lemort, Vincent	59
Le Pierrès, Nolwenn	12, 22, 23, 37
Le Reun, Adrien	108
Le Roux, Diane	43, 60, 134
Le Savoureux, Benjamin	81
Lescot, Hubert	51
Letessier, Jordan	74
Lévy, Arthur	164, 207
Liémans, Benoit	34
Lin, Jian	8
Lin, Qiao	129
Lips, Stéphane	11
Li, Simon	168
Lombardot, Christophe	62
Lomet, Aurore	45
Lontsi, Frédéric	177
Loukil, Faiza	36
Loulou, Tahar	130
Lucas, Franck	32
Luis Da Gama, Modesto José	123
Luna Valencia, Juan	185
Lushnikova, Anna	18, 72, 143
Lybaert, Paul	46

M

M'Saouri El Bat, Adnane	47, 147
Maalouf, Chadi	153
Madec, Yannick	129
Magueresse, Anthony	43
Mahdaoui, Mustapha	15
Mahmoud, Taim	194
Maiga, Mahamadou	25
Mailhé, Clément	192
Maillet, Denis	88
Maire, Jérémie	74, 127
Malanda, Drake Atique	182
Malherbe, Lénaïc	153
Mancaux, Jean-Marie	16, 121
Manescau, Brady	86
Mantel, Dimitri	107
Marc, Olivier	62, 153
Margeuret, Alexandre	189
Mariotto, Mathieu	80, 170
Maris Da Silva Filho, Joao Marcelo	185
Martin, Céline	195
Martin, Jean-François	62
Martin, Nathan	13
Martiré, Antoine	93

Masson, Renaud	203
Mateos Canseco, Alejandro	189
Matry, Hugo	144
Matteo, Laura	29
Mauger, Gédéon	29
Ménézo, Christophe .. 18, 19, 28, 38, 72, 138,	142, 143
Messan, Adamah	12, 140
Meulemans, Johann	193
Meunier, Francis	115
Mevy, Jean-Philippe	208
Mhiri, Hiba	72, 143
Michel, Benoit	35
Michon, Yannick	163
Miscevic, Marc	14, 70
Mohammadpour, Hamidreza	148
Monet-Vidonne, Clément	135
Moreau, Florian	82
Mortada, Mostafa	101, 119, 161
Moufid, Fouad	40
Mougenot, Louis	53
Moussallem, Rita	131, 169
Mousseau, Pierre	129
Muller, Anouk	21
Museau, Matthieu	189
Musy, Marjorie	144

N

N'Tsoukpoe, Kokouvi Edem	12, 23–25
N'Tsoukpoe, Komlan Gagno José	24
N'Wuitcha, Kokou	91
Nadjingar, Djérambété Aristide	12
Naimi, Youssef	145
Nérot, Boris	28, 36, 45
Ngo, Tien Tung	182
Nicolas, Vincent	172
Ni, Jianan	133
Nisar, Hamza	138, 142
Noé Beaupere, Noé Beaupere	182
Noël, Hervé	43, 60
Noroozi, Mona	139

O

Oliveira, Arthur	196
Olivès, Régis	16, 55, 121
Ollaic, Ghadir	71
Orlande, Helcio	120, 123, 125
Ouambo Tobou, Raoul	177
Ouardouz, Mustapha	15
Ouattara, Ou Adeline	12
Oumer, Oreen	61
Ouvrier-Bonnaz, Ophélie	47
Ozene, Valery	122

P

Pabiou, Hervé	109
Pacheco, César	120
Pailha, Mickael	126
Palma, Marta	100
Pannier, Marie-Lise	160
Paran, Axel	35
Payebien, Benoît	20
Penazzi, Léa	91, 190, 206
Perier-Muzet, Maxime	16, 55
Perin, Thibault	160
Perrier, Pierre	75
Perrin, Mickaël	105
Petit, Johann	201
Peyrol, Eric	148
Pham, Quynh Trang	157
Pham, Van Kha	22
Phan, Hai Trieu	22
Pierre, Thomas	66, 125
Piguet, Antoine	56
Pinet, Patrick	184
Plantec, Yohan	155
Popa, Catalin	83
Potaufoux, Thomas	188
Poulesquen, Arnaud	84
Pouvreau, Cédric	66
Preisner, Juliana	152
Py, Xavier	49, 181

Q

Quéméner, Olivier	133
Quentel, Lilou	194

R

Rambure, Nicolas	103
Ramousse, Julien	13, 33, 36, 45, 106
Randrianalisoa, Jaona Harifidy	64, 100
Randriantsoa, Ando Ny Aina	134
Ranjaranimaro, Pierrot	134
Raybaud, Perceval	32
Redjala, Ilyes	163
Rémy, Benjamin	88, 193
Renaudière De Vaux, Sébastien	14
Rendu, Manon	159
Reneaume, Jean-Michel	41
Reoyo-Prats, Reine	57
Reulet, Philippe	118
Revellin, Rémi	35
Rhazi, Oume-Lgheit	109
Richermoz, Nathan	157
Rigollet, Fabrice	135, 190, 206
Rimbert, Nicolas	94
Rioual, Francois	89

Robinet, Antonin	202
Rochais, Denis	206
Rodiet, Christophe	71, 128
Rodler, Auline	13, 33, 144, 148
Roger, Maxime	190
Romagnoli, Davide	38
Romani, Zaid	147
Romulus, Estelle	195
Rongier, Clément	103
Rosso, Judy	168
Rouabah, Farid	158
Rouchier, Simon	183
Rouizi, Yassine	133
Rousseau, Benoît	65, 90, 172, 206
Roux, Stéphane	165
Roy, Jean-Claude	105
Royon, Laurent	176
Rozembaum, Olivier	156
Ruffio, Emmanuel	124, 132, 156, 171
Rulière, Romuald	51
Russeil, Serge	34, 104
Ruyer-Quil, Christian	17

S

Saba, Ahmed	145
Sabri, Soulaïmane	15
Saidani, Baraa	201
Saidi, Sirine	79
Salagnac, Patrick	141, 159
Salah, Mehdi	43
Salort, Julien	87
Sanglard, Bastien	26
Sanjivy, Kanhan	32
Santamouris, Mattheos	138, 142
Sanya, Arthur	50
Sartre, Valérie	167
Saury, Didier	82
Schick, Vincent	193
Scrève, Julien	27
Seck, Mame Sokhna Thiane	23
Seiler, Nathalie	94
Sellami, Ilyas	86, 202
Sentenac, Thierry	184
Sergent, Anne	87
Serra, Sylvain	41
Sesmat, Alexis	53
Seyve, Yoann	167
Simonetto, Fabio	100
Singama, Loïc	62
Siroux, Monica	8
Sobotka, Vincent	169
Sochard, Sabine	112
Somda, Souwera Stan Lionnel	12

Sommier, Alain	191
Somrani, Oumayma	95
Soto, Jérôme	49, 177
Souveton, Mahé	204
Sterna, Léo	80
Storti, Bruno	108
Stouffs, Pascal	9
Striegel, Lucas	7
Stutz, Benoît	11, 85, 96, 98, 114
Sy, Awa	96

T

Tadrist, Lounès	200
Taleb, Kaoutar	92
Tallon, Jean	180
Talu, Orhan	115
Tantot, Olivier	64
Tauveron, Nicolas	20, 29, 113
Tecchio, Cassiano	199
Terrien, Thomas	96
Tezza, Andrea	100
Thebault, Martin	19, 28, 38, 106
Timchenko, Victoria	148
Tochon, Patrice	37
Topin, Frédéric	14, 75, 91, 168, 198
Touoyem Talla, Jesse Allens	64
Toutant, Adrien	205
Tran, Khanh-Hung	79
Traore, Papa Touty	154
Tu, Junhao	75

U

Ulanowski, Yan	161
Untrau, Alix	112

V

Vaglio-Gaudard, Claire	29
Vasset, Nicolas	41, 56
Veca, Morgane	118
Venobre, Lucas	190
Vernier, Joseph	109
Videau, Jean-Baptiste	33
Vieira Da Silva Oliveira, Arthur	185
Villeneuve, François	189
Visse, Sébastien	40
Vuillerme, Valéry	39, 48, 54, 180
Vuillon, Laurent	45

W

Waeytens, Julien	161
Walther, Edouard	7, 175
Waroquier, Pierre	164, 207
Wassermann, Anthony	107
Winkler, Jean-Gabriel	47

Woloszyn, Monika 139

X

Xin, Shihe 42

Y

Yahiat, Feriel.....104

Z

Zalewski, Laurent..... 126

Zamanski, Rémi 110

Zeitoun, Wael 8

Zghal, Jihed 201

Zibouche, Kamel 101, 119, 161

Zorom, Malicki 24