

THERMIQUE ET ARCHITECTURE

MONICA SIROUX

RECUEIL DES RÉSUMÉS

DU

CONGRÈS ANNUEL DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE

SFT 2024

4 — 7 JUIN 2024

STRASBOURG

ORGANISÉ PAR

ICUBE (UMR 7357 - LABORATOIRE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR, DE L'INFORMATIQUE ET DE
L'IMAGERIE)

Première partie

Introduction

Parrainages

Le Congrès Français de Thermique, SFT 2024, organisé par l'ICube (UMR 7357) a bénéficié du parrainage et du soutien des institutions et des organismes suivants :

Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, ICUBE (UMR 7357)

300 bd Sébastien Brant
CS 10413 - F-67412 Illkirch Cedex
<https://icube.unistra.fr/>



Institute National des Sciences Appliquées INSA - Strasbourg

24 Bd de la Victoire
67000 Strasbourg
<https://www.insa-strasbourg.fr/>



Université de Strasbourg

4 rue Blaise Pascal
CS 90032 F-67081 Strasbourg cedex
<https://www.unistra.fr/>



Ecole d'ingénieur Génie de l'eau et environnement de Strasbourg - ENGEES

1 cour des cigarières
CS 61039, 67070 Strasbourg
<https://engees.unistra.fr/>



Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS

23 Rue du Loess
67200 Strasbourg
<https://www.alsace.cnrs.fr/>



Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique - Inria

2 Rue Marie Hamm
67000 Strasbourg
<https://inria.fr/>



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

COMSOL France

10 avenue Doyen Louis Weil
38000 Grenoble, France

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

Contact : Frédéric BERNARD

☎ 04 76 46 49 01

✉ frederic.bernard@comsol.fr



DEWESoft

14 rue René Cassin
91300 Massy, France

<https://dewesoft.com/>

Contact : Fabien JEANDENANS

☎ 01 75 64 19 30

✉ fabien.jeandenans@dewesoft.com



TELOPS

6 rue du Docteur Schweitzer
91420 Morangis, France

<https://www.telops.com/>

Contact : Stéphanie GUERARD

☎ +1 418-864-7808

✉ stephanie.guerard@telops.com



THEMACS Ingénierie

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

themacs-engineering.com

Contact : Jean-Pierre MONCHAU

☎ 06 29 82 44 34

✉ monchau@themacs.fr



Comité d'organisation

Equipe locale

Le congrès de la SFT 2024¹ s'est déroulé du 4 au 7 juin 2024 sur le thème **Thermique et Architecture**. Il a été organisé par les personnels du Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, ICUBE (UMR 7357)².

Présidente : Monica SIROUX

Secrétariat scientifique : Jian LIN

Comité d'organisation local : Zhi CHEN, Chaimaa DELASSE, Anas EL MAAKOUL, Denis FUNF-SCHILLING, Marc KAMTCHEU, Mathieu LABAT, Safaa LAHAYRECH, Tania LANDES, Vincent LECOMTE, Dexin LIU, Emile MARIE, Bazam Amonet OUOBA/NEBIE, Clément RIGAL, Lucas STRIEGEL, Qianwen TAN, Renzhi WANG, Wael ZEITOUN

Gestion Editoriale : Jian LIN, Mathieu LABAT, Wael ZEITOUN

Support administratif : Anne Sophie GOUDOT

Support Web : Audrey DUPUIS de la société Insight-Outside³

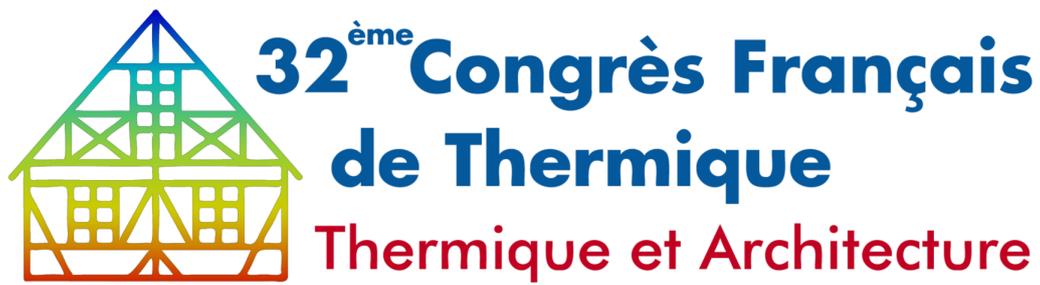
Comité Scientifique de la SFT

Nadine Allanic	GEPEA - Nantes	Joël Lallier	THALES, Eliancourt
Jérôme Bellettre	LTeN, Nantes	François Lanzetta	FEMTO-ST - Belfort
Philippe Baucour	FEMTO-ST - Belfort	Najib Laraqi	ALTIE, Ville d'Avray
Romuald Rulliere	LIMSI, Orsay	Marjolaine Legay	Ariane Group-Le Haillan
Céline Morin	LAMIH - Valenciennes	Denis Lemonnier	Pprime - Poitiers
Didier Delaunay	LTeN, Nantes	Christophe Le Niliot	IUSTI, Marseille
Bernard Desmet	ENSIAME, Valenciennes	Johann Meulemans	Saint-Gobain, Paris
Marie-Christine Duluc	CNAM, Paris	Pierre Millan	ONERA, Toulouse
Thierry Duvaut	ITheMM - Reims	Christophe Rodiet	ITHeMM, Reims
Patrick Glouannec	LIMATB, Lorient	Patrick Salagnac	LASIE, La Rochelle
Michel Gradeck	LEMTA, Nancy	Didier Saury	Pprime, Poitiers
Philippe Lemasson	UBS - Lorient	Sylvain Serra	LATEP – Pau
Christophe Journeau	CEA, Cadarache		

1. <https://2024.congres-sft.fr/>

2. <https://icube.unistra.fr/>

3. <https://www.insight-outside.fr/>



Strasbourg | 4 - 7 JUIN 2024

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.

Frédéric Andre	Jean-Luc Bailleul	Jean-Christophe Batsale
Jean-Luc Battaglia	Philippe Baucour	Nicolas Baudin
Jean-Pierre Bedecarrats	Jérôme Bellettre	André Bergeron
Nicolas Blet	Jean Luc Bodnar	Pascale Bouvier
Cyril Caliot	Xavier Chesneau	Jean-François Cornet
José Lara Cruz	Jérémi Dauchet	Fabien Delaleux
Sébastien Denis	David Donjat	Marie-Christine Duluc
Jean Pierre Dumas	Jean Dumoulin	Olivier Farges
Nolwenn Fleurence	Stéphane Fohanno	Jean-Pierre Fradin
Jonathan Gaspar	Rémi Gautier	Edouard Geslain
Stéphane Gibout	Michel Gradeck	Marie-Marthe Groz
Michel Havet	Nicolas Horny	Nicolas Huc
Christophe Journeau	Matthieu Labat	Alexandre Labergue
Stéphanie Lacour	François Lanzetta	Damien Lecointe
Thierry Lemenand	Denis Lemonnier	Renan Leon
Jian Lin	Denis Maillet	Jérémie Maire
Olivier Marc	Johann Meulemans	Pierre Millan
Ahmed Ould El Moctar	Jean-Pierre Monchau	Xavier Nicolas
Raymond Peiffer	Ugo Pelay	Thomas Pierre
Laurence Pietri	Hervé Pron	Xavier Py
Olivier Quemener	Julien Ramousse	Jaona Harifidy Randrianalisoa
Elissa El Rassy	Mourad Rebay	Philippe Reulet
Fabrice Rigollet	Christophe Rodiet	Stéphane Roux
Laurent Royon	Romuald Rullière	Serge Russeil
Patrick Salagnac	Didier Saury	Vincent Schick
Sylvain Serra	Monica Siroux	Jérôme Soto
Pascal Stouffs	Benoit Stutz	Frédéric Topin
Karim Touati	Adrien Toutant	Brice Tremeac
Gerard Vignoles		

Le mot du comité d'organisation

Le Congrès de la Société Française de Thermique a lieu pour la première fois à Strasbourg. A la fois capitale européenne et capitale alsacienne, Strasbourg est une grande ville universitaire s'appuyant sur le dynamisme de son université et de ses nombreux laboratoires de recherche pour asseoir sa réputation d'excellence.

La 32ème édition du Congrès Français de Thermique se déroulera du 4 au 7 juin 2024. Son organisation est assurée par le Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, ICUBE. Cette unité mixte de recherche est placée sous la tutelle de l'Université de Strasbourg, du CNRS, de l'INSA Strasbourg, de l'ENGEEES et de l'Inria Grand Est.

Le site retenu est l'INSA Strasbourg, qui répond parfaitement au cahier des charges d'un tel événement et bénéficie d'une situation géographique privilégiée au coeur de la capitale alsacienne.

Le thème scientifique choisi pour cette édition est "**Thermique et Architecture**". En effet, les transferts thermiques à l'échelle d'un bâtiment et de la ville relient les disciplines de l'ingénierie et de l'architecture. L'objectif du 32ème Congrès Français de Thermique est d'inviter la communauté de thermiciens à jeter une lumière nouvelle sur les relations complexes entre la thermique et l'architecture dans le contexte actuel de la transition énergétique.

Au-delà de cette thématique, ce congrès constitue une excellente occasion pour les chercheurs, industriels et doctorants d'échanger sur leurs dernières préoccupations et de présenter leurs travaux récents dans le domaine de la thermique et de ses applications au cours des différentes séances : conférences plénières, sessions de communications par affiches et ateliers-débats.

Nous avons reçu 119 propositions de résumés. 64 communications ont été acceptées pour publication dans les actes du congrès et 55 communications ont été retenues pour être présentées sous forme d'affiche.

Le Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique a classé 5 communications pour le prix Biot-Fourier. Ces communications seront proposées pour publication dans la revue ISTE Entropie : thermodynamique-énergie-environnement-économie.

Le Comité d'organisation remercie tout particulièrement nos collègues du Conseil d'Administration et du Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique pour leur confiance et leur soutien dans l'organisation du 32ème Congrès Français de Thermique.

Enfin, nous remercions sincèrement les orateurs ainsi que tous les auteurs pour avoir contribué à cette conférence.

Le comité d'organisation est très heureux de vous accueillir pour un moment de partage des connaissances, d'excellence scientifique et de convivialité et vous souhaite un excellent congrès.

Monica SIROUX
et l'ensemble du comité d'organisation local

Prix Biot-Fourier

Cinq contributions ont été présélectionnées pour le Prix Biot-Fourier. Les auteurs[†] présenteront leurs travaux à l'occasion des sessions orales.

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

Apport des modèles réduits pour l'identification expérimentale de la diffusivité thermique des métaux liquides

Thomas Pierre^{1,*}, Frédéric Joly², Jad Houssein^{3,†}, Mickael Courtois³, Olivier Quemener², Muriel Carin³

* ✉ : thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Institut de Recherche Dupuy de Lôme (France)

² Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry (France)

³ Institut de Recherche Dupuy de Lôme (France)

Mots clés : Modèles réduits, Diffusivité thermique, Métaux liquides, Processus numérique inverse

(Cf. page [49](#))

Transient hygrothermal CFD model of Trombe wall system

Nour El Zein^{1,*}, Yacine Ait Oumeziane¹, Sylvie Begot¹, Valérie Lepiller¹, Philippe Desevaux¹

* ✉ : nour.elzein@femto-st.fr

¹ FEMTO-ST Institute, Université de Franche-Comté, CNRS, Belfort, France (France)

Mots clés : Trombe Wall, Transient CFD Modeling, Hygrothermal Behavior, Thermal Comfort

(Cf. page [35](#))

Stockage de chaleur thermochimique : expérimentation de différents matériaux composites innovants

Elise Bérut^{1,‡}, Michel Ondarts¹, Laurence Bois², Jonathan Outin¹, Nolwenn Le Pierrès^{1,*}

* ✉ : nolwenn.le-pierres@univ-smb.fr

¹ LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (France)

² Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces (LMI)

Mots clés : Stockage de chaleur, Sel thermochimique, Sorbants composites, Polyéthylène glycol

(Cf. page [21](#))

Modélisation spectrale des écoulements fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires

Léa Cherry^{1,*‡}, Gilles Flamant¹, Françoise Bataille¹

* ✉ : lea.cherry@promes.cnrs.fr

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (France)

Mots clés : Récepteur solaire, Ecoulement anisotherme, Modèle de turbulence, Couplage thermique, dynamique

(Cf. page [46](#))

Modélisation numérique et caractérisation des transferts thermo-hydriques lors de la cuisson de gâteaux

Patrick El Helou^{1,*‡}, Pascal Le Bideau¹, Adrien Fuentes¹, Patrick Glouannec¹

* ✉ : Patrick.el-helou@univ-ubs.fr

¹ Université de Bretagne Sud (France)

Mots clés : Modèle numérique multiphysique, Transfert thermo, hydrique, Milieu poreux

(Cf. page [98](#))

Table des matières

I Introduction	iii
Parrainages	v
Comité d'organisation	vii
Liste des relecteurs	ix
Le mot du comité d'organisation	xi
Prix Biot-Fourier	xiii
Apport des modèles réduits pour l'identification expérimentale de la diffusivité thermique des métaux liquides	xiii
Transient hydrothermal CFD model of Trombe wall system	xiii
Stockage de chaleur thermochimique : expérimentation de différents matériaux composites innovants	xiv
Modélisation spectrale des écoulements fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires	xiv
Modélisation numérique et caractérisation des transferts thermo-hydriques lors de la cuisson de gâteaux	xiv
Table des matières	xiv
II Résumé des communications	1
1 Energétique	3
Analyse de l'écoulement supersonique avec changement de phase dans un éjecteur conçu pour un cycle de production de froid	5
Comparaison de procédés de valorisation énergétique de boues digérées par analyse environnementale	6
200 ANS DE LA PARUTION DU LIVRET DE S. CARNOT/ UN EXEMPLE A SUIVRE	7
Développement d'un modèle semi-analytique pour la prédiction du comportement thermique et énergétique d'un panneau photovoltaïque en conditions réelles de fonctionnement	8
Evaporation du CO ₂ dans des microcanaux en silicium : performances thermiques et visualisations d'écoulement	9

Etude du transfert d'humidité dans le sol et ses implications pour les systèmes géothermiques peu profonds	10
Amélioration des performances d'un panneau photovoltaïque-thermique refroidi par air en utilisant des générateurs de vortex et un modèle de contrôle prédictif économique . . .	11
Etude énergétique et environnementale des systèmes de production d'eau chaude sanitaire en France : lequel du chauffe-eau thermodynamique ou du chauffe-eau solaire est le plus soutenable ?	12
Comparaison des performances d'une DSC à flux de chaleur et d'une DSC à compensation de puissance pour l'étude des changements de phase de paraffines	13
Etude des mécanismes de transitions de phases réversibles solide - liquide de matériaux à changement de phases	14
Etude d'un système de récupération de chaleur sur eaux grises couplé à un chauffe eau thermodynamique	15
Comparative investigation of methods for incorporating real climate data into thermal quadrupoles models : fitting techniques, integral transforms, and inversion algorithms . . .	16
Caractérisation des MCP microencapsulés en suspension	17
Study of the Influence of Cooling Rate on Water Supercooling	18
Stability analysis of Calcium chloride hexahydrate inorganic phase change material	19
Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with various renewable energy sources	20
Stockage de chaleur thermochimique : expérimentation de différents matériaux composites innovants	21
Ecoulement convectif d'un nanofluide dans un canal à parois ondulées équipé de sources de chaleur et d'un obstacle solide sous l'effet d'un champ magnétique localisé	22
Stockage d'énergie par pompage thermique low-tech à faible empreinte carbone en milieu minier : revue critique de la faisabilité du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches locales	23
Batterie de Carnot intégrée thermiquement au réseau de chaleur de l'Université de Liège .	24
Modélisation dynamique et validation expérimentale d'une batterie thermique à base de matériaux à changement de phase	25
The relationship between efficiency and flow regimes for a chaotic heat exchanger.	26
Investigation sur les écoulements alternés liquide appliqués au chauffage rapide des piles à combustible	27
2 Modes de transfert	29
Etude expérimentale de l'influence du rayonnement sur la dynamique d'un écoulement turbulent de convection naturelle en cavité différentiellement chauffée	30
Etude expérimentale des mécanismes de conversion électromécanique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage	31
Numerical simulation of Stirling cycle heat pumps by simple adiabatic method	32
Etude expérimentale et numérique d'un incendie en tunnel en phase de construction	33
Caractérisation multi-échelle des propriétés thermiques et hydriques des matériaux de construction à base de briques en terre crue	34

Transient hygrothermal CFD model of Trombe wall system	35
Distributed thermoelectric model of a PV module : effect of inhomogeneous boundary conditions	36
Convection de double diffusion couplée au rayonnement, dans une cavité poreuse saturée par un fluide semi-transparent	37
Caractérisation expérimentale et modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un béton cellulaire	38
Natural convection flow of a nanofluid-filled W-shaped cavity	39
Analyse et modélisation d'un évaporateur solaire pour le traitement de déchets liquides	40
Mathematical Modeling of a Batch-Operated Bubble Column Humidifier for Seawater Desalination	41
3 Modélisation et Simulation Numérique	43
Rénovation énergétique des bâtiments en Algérie	45
Modélisation spectrale des écoulements fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires	46
Simulation Numérique de la Convection Double Diffusive dans un Demi-disque 2D avec température inhomogène sur la voûte	47
Modélisation et simulation d'un cycle OTEC et étude d'un couplage avec un système de climatisation par eau de mer profonde (SWAC)	48
Apport des modèles réduits pour l'identification expérimentale de la diffusivité thermique des métaux liquides	49
Implémentation de résistances de contact en 2-D dans un circuit équivalent. Thermique d'une encoche statorique d'un moteur électrique	50
Résolution des transferts de chaleur par Monte Carlo dans une géométrie urbaine lors d'une vague de chaleur	51
Modélisation des transferts radiatifs avec fluorescence pour la quantification de biomarqueurs en neurochirurgie	52
Mise en place d'une méthodologie de construction de benchmarks pour la validation des modèles de microclimat urbain	53
Etude de la convection naturelle transitoire d'un fluide à grande thermodépendance en viscosité en configuration cylindrique	54
Etude expérimentale de l'effet de la rugosité sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide	55
Modèle zonal d'un échangeur avec changement de phase : formulation big M pour l'optimisation	56
Impact du cisaillement liquide-vapeur sur un écoulement diphasique à film tombant dans un échangeur de chaleur à plaques d'une machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	57
Emissivité hémisphérique d'une cavité isotherme cylindrique ou rectangulaire	58
Dimensionnement de fissures non débouchantes dans des pièces métalliques par thermographie laser	59
Etude expérimentale et numérique des déformations pariétales sur l'intensification des transferts de chaleur et du mélange dans un écoulement interne tubulaire	60

Démonstration de faisabilité : apprentissage faiblement supervisé pour la reconstruction a priori de SGE-T utilisant des corrélations en deux points	61
Etude par LES avec TrioCFD des modifications des structures turbulentes thermiques induites par les variations des propriétés thermophysiques de l'eau	62
Etude de la conductivité thermique des nanofils modulés de Silicium par la méthode de Monte Carlo combinée au formalisme de Green-Kubo	63
Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro classique : Analyse des performances de combustion et impact sur les émissions polluantes	64
Modélisation analytique des transferts thermiques en régime permanent dans les parois ventilées à double peau grâce à la méthode des quadripôles.	65
Enhancing the Thermal Performance of Electric Cable-heated Pavement by Asymmetrical Thermal Insulation Coating : A Numerical Simulation Study	66
Génération procédurale de géométrie urbaine pour la thermique	67
Etude numérique du refroidissement de la maille élémentaire d'un milieu poreux homogène traversé par une suspension de microparticules à changement de phase	68
Numerical simulation of a Phase Change Material/Water Cylindrical Heat Exchanger : A Smart PCM Mobile Bathroom	69
Analyse numérique des flux radiatifs permettant de calculer la température moyenne radiante d'un piéton dans une rue canyon en été	70
Evaluation des propriétés thermiques des blocs d'argile compacts stabilisés avec des cendres de bois ou des déchets de poterie traditionnels	71
Développement et validation d'un outil de simulation numérique pour l'étude du masquage radiatif des brouillards multi-composants réactifs.	72
Spatiotemporal variability of solar radiations within an urban context : a characterisation by means of Principal Component Analysis	73
Anisothermal gas–particle flow simulations for concentrated solar applications	74
Analyse comparée de méthodologies de modélisation du couplage conduction-rayonnement au sein de matériaux poreux semi-transparents	75
4 Métrologie et Techniques Inverses	77
Modèle convolutif pour l'estimation des températures de jonctions au sein d'un onduleur triphasé	78
Identification de la conductivité thermique des polymères semi-cristallins en cours de transformation	79
Méthodes de quantification de la température d'émission d'un verre sodo-calcique pour la cartographie 2D de son émissivité apparente en conditions extérieures	80
Caractérisation de matériaux de stockage thermique par bilan entropique : analyse des irréversibilités et mesure des propriétés.	81
Vers une méthodologie expérimentale pour l'évaluation du confort thermique extérieur, application au campus de l'ESTP à Cachan	82
Caractérisation de matériaux nanostructurés par microscopie thermique à sonde locale associée à une méthode inverse	83

Estimation du flux de chaleur sur les composants face au plasma du Tokamak WEST par réseau de neurones	84
Méthode de détection et de reconstruction de défauts internes et débouchants dans des pièces métalliques	85
Défis et Innovations en Thermique des Semi- Conducteurs WBG : Modélisation Dynamique et Validations Expérimentales	86
Imagerie en thermotransmittance : premières tentatives vers une super résolution	87
Mesure de température d'interface lors d'un soudage par résistance par point	88
Contrôle Non Destructif Quantitatif d'une Résistance Thermique d'Interface de Faible Valeur par Mesure de Températures Bifaces	89
Estimation du flux de chaleur extrait à la paroi par l'impact d'une goutte	90
Temporal Averaging Method for Improved NETD of High-Speed Infrared Cameras	91
Caractérisation des transferts de masse au sein des membranes polymères d'électrolyseurs microfluidiques par spectroscopie infrarouge.	92
Mesure sans contact de champs de température dans les milieux semi-transparents par thermotransmittance infrarouge	93
5 Thermique appliquée	95
Caractérisation du biotope dû à la condensation dans un échangeur air-sol (EAHE) pour analyser le risque sanitaire	97
Modélisation numérique et caractérisation des transferts thermo-hydrauliques lors de la cuisson de gâteaux	98
Corrélations technico-économiques pour la modélisation d'un système de trigénération pour bâtiments. Application sur le campus de l'Université Paris Nanterre	99
Redéfinir le calcul des apports et des déperditions du bâtiment dans une vision maquette numérique.	100
Evaluation de l'intensification du transfert de chaleur dans une unité de stockage thermique latent par l'utilisation d'une géométrie d'échange de type multitube et calandre aileté	101
Analyse de l'impact thermique dans les sols lors du passage d'un feu de végétation : Application à la sécurisation des zones de vestiges de guerre	102
Influence d'une source interne sur la température de Leidenfrost – application à un écoulement de type DFFB	103
Energy and exergy analysis of building envelope with different sustainable insulation materials	104
Etude par simulation thermique dynamique de l'intégration d'une installation de panneaux aérovoltaiques sur une maison dite passive.	105
Comportement thermique des murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi	106
Etude expérimentale de l'échauffement de câbles électriques en fonction de la configuration d'installation	107
Bâtiments NZEB : Etat des lieux et applicabilité à un bâtiment de bureaux dans le contexte tropical chaud du Burkina Faso	108

Mesure de la conductivité thermique de matériaux isolants bio/géosourcés humides	109
Heat transfer analysis of using an electric resistant paint on road de-icing	110
Prédiction des performances thermo-hydrauliques de mini-canaux ondulés obtenus par fabrication additive	111
Thermal measurement campaign in three streets of Strasbourg to study interactions between trees and facades	112
Caractérisation thermique dynamique des enveloppes de bâtiments en temps réel : Une approche par décomposition en mode dynamique	113
Experimental comparison of a geothermal rainwater tank and other ground-coupled heat exchanger technologies for passive cooling	114
Redéfinir le calcul des apports et des déperditions du bâtiment dans une vision maquette thermique	115
Etude théorique et numérique de batteries de Carnot novatrices	116
Caractérisation d'une double peau vitrée placée sur l'enveloppe des bâtiments anciens pour réduire leur consommation énergétique	117
Système de Refroidissement Passif : Utilisation de la fraîcheur souterraine pour un confort thermique optimal pendant les saisons chaudes	118
Etude de l'ébullition dans un milieu poreux pour une application de type caloduc	119
Optimisation de l'isolation thermique d'un géopolymère à base de métakaolin renforcé par des fibres de miscanthus	120
Modeling of urban heat island effect on thermal comfort in urban open spaces, case study : ESTP Cachan campus	121
Evaluation de la conductivité thermique de composites à base de fibres de <i>Furcraea foetida</i> et de plâtre	122
Etude préliminaire de la caractérisation des performances thermo-hydrauliques de nouveaux fluides caloporteurs	123
Analyses expérimentales et numériques des émissions polluantes gazeuses et particulaires issues de la combustion biomasse	124
6 Transferts en milieux hétérogènes	125
Revue bibliographique menée par analyse de texte : application aux transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi poreuse biosourcée	126
Artificial Neural Networks -Driven Empirical Correlations for Enhanced Understanding of Closed-Loop Pulsating Heat Pipe Dynamics (CLPHP)	127
Modélisation multi-échelles des propriétés thermo-radiatives d'une céramique de CeO ₂ à haute température	128
Optimisation du transfert de chaleur dans un matériau à changement de phase par l'intermédiaire d'ailettes	129
Modélisation numérique des transferts thermiques lors de la trempe d'un alliage métallique oxydé	130
Modélisation et simulation 3D de l'écoulement et du transfert thermique dans un réacteur tubulaire à lit de billes	131
Boundary Conditions in Hygrothermal Measurements of Biobased Material	132

Conductivity measurements on bio-based, cellulosic materials	133
Caractérisation thermique de matériaux textiles ou composites tissés périodiques par méthode flash - Aspects 3D et multiéchelles.	134
Liste des auteurs	135

Deuxième partie

Résumé des communications

Thème 1

Energétique

Analyse de l'écoulement supersonique avec changement de phase dans un éjecteur conçu pour un cycle de production de froid	5
Comparaison de procédés de valorisation énergétique de boues digérées par analyse environnementale	6
200 ANS DE LA PARUTION DU LIVRET DE S. CARNOT/ UN EXEMPLE A SUIVRE	7
Développement d'un modèle semi-analytique pour la prédiction du comportement thermique et énergétique d'un panneau photovoltaïque en conditions réelles de fonctionnement	8
Evaporation du CO ₂ dans des microcanaux en silicium : performances thermiques et visualisations d'écoulement	9
Etude du transfert d'humidité dans le sol et ses implications pour les systèmes géothermiques peu profonds	10
Amélioration des performances d'un panneau photovoltaïque-thermique refroidi par air en utilisant des générateurs de vortex et un modèle de contrôle prédictif économique	11
Etude énergétique et environnementale des systèmes de production d'eau chaude sanitaire en France : lequel du chauffe-eau thermodynamique ou du chauffe-eau solaire est le plus soutenable ?	12
Comparaison des performances d'une DSC à flux de chaleur et d'une DSC à compensation de puissance pour l'étude des changements de phase de paraffines	13
Etude des mécanismes de transitions de phases réversibles solide - liquide de matériaux à changement de phases	14
Etude d'un système de récupération de chaleur sur eaux grises couplé à un chauffe eau thermodynamique	15
Comparative investigation of methods for incorporating real climate data into thermal quadrupoles models : fitting techniques, integral transforms, and inversion algorithms	16
Caractérisation des MCP microencapsulés en suspension	17
Study of the Influence of Cooling Rate on Water Supercooling	18
Stability analysis of Calcium chloride hexahydrate inorganic phase change material	19
Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with various renewable energy sources	20
Stockage de chaleur thermo-chimique : expérimentation de différents matériaux composites innovants	21
Écoulement convectif d'un nanofluide dans un canal à parois ondulées équipé de sources de chaleur et d'un obstacle solide sous l'effet d'un champ magnétique localisé	22
Stockage d'énergie par pompage thermique low-tech à faible empreinte carbone en milieu minier : revue critique de la faisabilité du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches locales	23
Batterie de Carnot intégrée thermiquement au réseau de chaleur de l'Université de Liège	24
Modélisation dynamique et validation expérimentale d'une batterie thermique à base de matériaux à changement de phase	25

The relationship between efficiency and flow regimes for a chaotic heat exchanger.	26
Investigation sur les écoulements alternés liquide appliqués au chauffage rapide des piles à combustible	27

Analyse de l'écoulement supersonique avec changement de phase dans un éjecteur conçu pour un cycle de production de froid

Hugues Charton¹, Christian Perret¹, Hai Trieu Phan^{1,*}

* ✉ : Haitrieu.PHAN@cea.fr

¹ Université Grenoble Alpes (France)

Mots clés : Ejecteur, Cycle de production de froid, Ecoulement supersonique, Modélisation CFD

Résumé :

L'éjecteur est le composant central de certains cycles de production de froid. Il utilise le fluide primaire à haute pression pour aspirer, entraîner et comprimer le fluide secondaire à base pression. Une voie possible pour augmenter l'efficacité énergétique du cycle de production de froid à éjecteur est de diminuer la surchauffe du fluide primaire ce qui peut amener l'apparition de condensation au sein de l'éjecteur. L'objectif de ce travail fut d'étudier l'impact de ces changements de phase sur l'écoulement au sein de l'éjecteur à l'aide du logiciel de modélisation CFD ANSYS Fluent. Plusieurs modèles de résolution numérique d'écoulement CFD au sein d'une tuyère et d'un éjecteur ont été mis en place. Les résultats de ces modèles ont été comparés avec des résultats expérimentaux de la littérature ainsi que des résultats de modèles analytiques. Les différents modèles ont tous montré des résultats cohérents sur la résolution de l'aspect hydrodynamique. En revanche seuls les modèles d'écoulement diphasique ont montré des résultats fiables concernant la résolution des champs de température. Parmi ces modèles, le modèle Wet-Steam a très bien fonctionné pour la résolution de l'écoulement au sein d'une tuyère mais a montré ses limites pour l'écoulement au sein d'un éjecteur. Le second modèle est le modèle eulérien homogène qui a montré des résultats réalistes en terme de conditions physiques des phases liquide et vapeur dans l'éjecteur. Il a également été observé que le changement de phase peut avoir un impact significatif sur la valeur de la pression critique en sortie, de manière à améliorer les performances de l'éjecteur.

Comparaison de procédés de valorisation énergétique de boues digérées par analyse environnementale

Luca Zanatta^{1,2}, Fabien Delaleux^{2,*}, Sylvain Dantu^{2,3}, Jean-Félix Durastanti²

* ✉ : fabien.delaleux@u-pec.fr

¹ SIARCE (France)

² Univ Paris Est Creteil, CERTES (France)

³ SPL Confluence Seine Essonne Energie (France)

Mots clés : Boues digérées, Impact environnemental, Boues digérées

Résumé :

La Société Publique Locale (SPL) Seine Essonne Energie a obtenu la gestion des stations d'épuration voisines d'Evry et Exona (Corbeil-Essonnes), depuis leur mutualisation en 2021, pour une capacité de traitement cumulée d'environ 350000 Equivalents Habitants, soit une capacité hydraulique de l'ordre de 46000 m³/j. La SPL a mené à bien un projet de méthanisation des boues d'épuration des deux STEP dans le but d'injecter le biogaz produit dans le réseau gazier en récupérant notamment la chaleur issue des effluents en sortie de la station d'épuration d'Evry afin de subvenir aux besoins thermiques des digesteurs. Dans une volonté de pousser la valorisation des ressources des STEP plus en profondeur et de transformer les stations d'épuration en centres de valorisation de l'eau et des déchets, une étude a été menée afin de comparer différents procédés de valorisation des boues digérées. L'objectif de cette étude est de comparer l'impact environnemental de deux voies de traitement et de valorisation thermique des boues digérées par rapport au procédé mis en place actuellement sur les sites. Alors que le procédé actuel de traitement des boues digérées comprend une déshydratation mécanique et une hygiénisation par compostage afin d'envoyer les boues en épandage, les procédés étudiés sont l'incinération spécifique sur site des boues préalablement déshydratées et la déshydratation mécanique des boues suivie d'un séchage thermique afin de les envoyer dans un centre de co-incinération. L'impact environnemental des procédés est centré sur les émissions de gaz à effet de serre en utilisant la méthode Bilan Carbone développée par l'ADEME. Pour chacun des procédés étudiés, deux cas de figure sont comparés en termes de quantités de CO₂ équivalente émises et évitées. Dans le cas de l'incinération spécifique des boues, l'impact de la valorisation des fumées d'incinération sous forme d'énergie électrique est comparé à son impact en cas de cogénération. Pour l'envoi des boues dans une unité de co-incinération, la différence entre l'utilisation de gaz naturel ou l'autoconsommation du biogaz produit par le site pour sécher les boues est étudié. Globalement, la balance énergétique est plus favorable dans le cas de l'envoi des boues digérées en unité de co-incinération par rapport aux deux autres procédés et la balance énergétique de l'incinération spécifique est plus défavorable que celle du compostage et de l'épandage des boues. L'utilisation du biogaz produit par la station d'épuration lors du séchage thermique des boues permet quant à elle de fortement réduire la quantité de gaz à effet de serre émis par le procédé au détriment d'une légère baisse des émissions évitées. Ce travail permet d'avoir une vision nouvelle sur les procédés de valorisation des boues d'épuration. En cumulant les approches énergétique, économique et environnementale, il est alors possible d'obtenir des études multicritères permettant d'avoir une vision globale des avantages et des inconvénients de la valorisation énergétique des ressources des stations d'épuration en vue de l'atteinte de leur neutralité carbone à l'horizon 2050.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-007>

200 ANS DE LA PARUTION DU LIVRET DE S. CARNOT/ UN EXEMPLE A SUIVRE

Michel Feidt^{1,*}

* ✉ : Michel.feidt@univ-lorraine.fr

¹ University of Lorraine (2 avenue de la Foret de Haye, 54518 Vandoeuvre CEDEX France)

Mots clés : CARNOT, Thermodynamique phénoménologique

Résumé :

Il y a deux siècles, CARNOT publiait un livret qui allait marquer la naissance de la thermodynamique phénoménologique, tant du point de vue appliqué (machine à vapeur), que du point de vue fondamental (fin du phlogistique). Deux cent ans plus tard, les résultats principaux de l'opuscule figurent dans tous les livres de thermodynamique macroscopique. Malgré cela, on a noté dans les années 1980, une nouvelle tendance, marquée par un article culte (article de CURZON et AHLBORN dans le journal of applied physics). On montre dans cette communication comment l'œuvre magistrale de CARNOT : - A d'abord été ignorée pendant quelques années, puis redécouverte, mais bien avant l'article de CURZON et AHLBORN - Un ensemble de publications montrent l'évolution lente des idées à partir du travail de CARNOT. - Actuellement le mouvement c'est accéléré pour aboutir à de nombreux prolongements et des résultats complémentaires nouveaux ; la liste de références pourrait être longue. Nous nous contenterons ici de rapporter des résultats majeurs et de l'évolution de la problématique de recherche- approfondissement. Les principaux courants recensés sont examinés dans ce travail : -analyse entropique, analyse exergétique pour les plus classiques. -F.T.T. (Finite Time Thermodynamics), F.S.T. (Finite Speed Thermodynamics). Pour notre part, nous avons essayé modestement d'apporter une unification large des divers courants aboutissant pour la Thermodynamique phénoménologique à ce que nous appelons F.D.O.T. (Finite physical Dimensions Optimal Thermodynamics). L'évolution vers quelques résultats phares est brièvement brossée. La connexion avec la thermodynamique relativiste et aussi quantique est entrain de se développer. Un bref aperçu de ces développements sera esquissé.

Développement d'un modèle semi-analytique pour la prédiction du comportement thermique et énergétique d'un panneau photovoltaïque en conditions réelles de fonctionnement

Candice Banes¹, Benjamin Gaume¹, Vincent Bourdin^{2,3}, Jordi Badosa⁴, Johan Parra⁴, Olivier Quemener^{1,*}, Anne Migan-Dubois²

* ✉ : O.Quemener@iut.univ-evry.fr

¹ Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry (France)

² Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris (France)

³ Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique (France)

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539)

Mots clés : Panneau photovoltaïque, Modèle semi, analytique, Mesures environnementales

Résumé :

La simulation du comportement thermique des panneaux photovoltaïques a fait l'objet de nombreuses publications ces dernières années, allant des solutions empiriques simples aux modèles numériques tridimensionnels complexes. Pour valider un modèle précis permettant d'évaluer la température des panneaux photovoltaïques en fonction des conditions environnementales, un dispositif de mesure a été mis en place. Il enregistre des données cruciales telles que la vitesse du vent, la température et l'humidité de l'air, les températures du sol, et la température radiative de la voûte céleste, la température de la face arrière des modules PV et les flux radiatifs (solaires directs et diffus -issu de la voûte céleste et réfléchi par le sol-, infrarouges intermédiaire ascendant et descendant). Cette campagne de mesure s'étale sur une année complète, avec une fréquence d'acquisition de l'ordre du Hertz et des moyennes prises par minute. La confrontation entre ces mesures et un modèle analytique simple prenant en compte le gradient thermique dans l'épaisseur du panneau montre que ce dernier permet d'obtenir la température des cellules avec une incertitude inférieure au degré Celsius lorsque les différents flux thermiques qui interviennent dans les échanges entre le panneau photovoltaïques et son environnement immédiat sont correctement pris en compte. Cette comparaison fait apparaître la pertinence du modèle pour l'intégralité de la campagne de mesure. Une comparaison avec les modèles empiriques utilisés en général pour prévoir la production des installations où la température n'est pas mesurée, montre l'apport de ce modèle simple. En conclusion, ce modèle numérique validé se révèle être un outil efficace et rapide pour analyser les différents facteurs qui influent sur l'efficacité des panneaux photovoltaïques. Il permet notamment de quantifier l'importance relative des différents flux thermiques et de prédire le comportement des panneaux en fonction de leurs constituants. Cette avancée est cruciale pour l'optimisation et l'amélioration des panneaux photovoltaïques, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace de l'énergie solaire.

Evaporation du CO_2 dans des microcanaux en silicium : performances thermiques et visualisations d'écoulement

Maxime Vacher^{1,2,*}, Frederic Ayela¹, Roman Kossakowski², Stéphane Jezequel², Pierre Delebecque², Damien Colombet¹

* ✉ : maxime.vacher@univ-grenoble-alpes.fr

¹ Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels [Grenoble] (France)

² Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules (France)

Mots clés : Evaporation du CO_2 , Microcanaux en silicium, Performance thermique

Résumé :

En raison de ses bonnes propriétés thermo-physiques, et de son faible GWP, pour certaines applications scientifiques, le CO_2 est considéré comme un fluide pertinent pour le refroidissement des appareils électroniques. La prochaine génération de détecteurs de traces au LHC (CERN) dont l'installation est prévue en 2027, sera refroidie à des températures comprises entre $+10^\circ\text{C}$ et -40°C , en évaporant du CO_2 liquide circulant dans des mini-canaux en titane attachés aux capteurs PIXEL en silicium de 4cm^2 [1]. Pour la prochaine génération de capteurs PIXEL qui suivront et seront installés sur le Future Circular Collider (FCC) d'ici 2040, une nouvelle solution développée par le CERN et étudiée par l'équipe LEGI-LAPP est de faire circuler le CO_2 dans des micro-canaux intégrés dans le silicium, couvrant toute la surface des détecteurs. Pour cela, il est nécessaire d'évaluer les performances thermiques de cette solution afin de valider ce choix technologique. Dans le cadre de cette thèse, plusieurs échantillons de multicanaux en silicium ont été réalisés en salle blanche, par des méthodes de lithographie/gravure chimique, à partir de wafers en silicium d'épaisseur 400 microns. Ces échantillons sont constitués d'une zone de détente (capillaires) reliée à une zone d'évaporation. Une plaque en pyrex scellée sur le silicium assure l'étanchéité de l'ensemble et permet l'observation des régimes d'écoulement durant l'ébullition. En parallèle de la fabrication des échantillons, un long travail a consisté à mettre au point des connectiques de raccord résistant aux pressions opératoires du CO_2 , entre 5 et 50 bars. Des tubes en laiton brasés à l'étain sur des dépôts de cuivre ont été validés à des pressions proches de 80 bars, puis utilisés pour équiper nos échantillons. Cette année, deux échantillons de 8 et 16 canaux en parallèle de dimensions $6\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ ont été caractérisés sur le banc d'essai du LAPP en écoulement de CO_2 bouillant, pour différentes conditions opératoires. Le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi en silicium et le CO_2 a été évalué pour des flux de chaleur allant de 10 kW/m^2 jusqu'à 150 kW/m^2 . La visualisation de l'écoulement par caméra rapide a permis d'identifier les différentes configurations d'écoulement rencontrées en fonction des conditions opératoires, et de faire le lien avec les variations du coefficient de transfert de chaleur. Nous avons observé que certains régimes d'écoulement limitent davantage l'élévation de température de paroi que d'autres. La deuxième image présentée montre un écoulement de type 'poches-bouchons' dans un échantillon comportant 16 multicanaux. Ces visualisations viennent compléter celles réalisées au CERN en écoulement de CO_2 bouillant sur des géométries de multi-microcanaux en silicium similaires [2]. Au-delà de cette analyse qualitative, le traitement des images de visualisations doit aboutir à l'identification des paramètres de l'écoulement associés à chaque régime, comme par exemple les longueurs de bulles et leur vitesse de croissance, en fonction du flux de chaleur appliqué. Ces données expérimentales serviront au développement d'un modèle numérique 2D dont l'objectif est de reproduire une des configurations d'écoulement observées ainsi que les tendances d'évolution du coefficient de transfert de chaleur. [1] BARROCA Pierre, Modeling CO_2 cooling of the ATLAS ITk Pixel Detector, These, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules, 2019. <https://hal.univ-smb.fr/tel-02956226>. [2] HELLENSCHMIDT Desiree, New insights on boiling carbon dioxide flow in mini-and micro-channels for optimal silicon detector cooling, CERN, 2020.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-018>

Etude du transfert d'humidité dans le sol et ses implications pour les systèmes géothermiques peu profonds

Wael Zeitoun¹, Jian Lin¹, Monica Siroux^{1,*}

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

¹ Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (France)

Mots clés : transfert d'humidité, systèmes géothermiques

Résumé :

L'étude de la performance des systèmes géothermiques peu profonds dépend de la variation de l'humidité dans le sol. La teneur en humidité est régulée par le transfert d'humidité dans le sol, qui semble dépendre des gradients d'humidité et de température à l'intérieur du sol. Pour étudier le transfert d'humidité dans le sol, deux coefficients de diffusivité de l'humidité sont nécessaires, qui dépendent également de la teneur en humidité, de la température et du type de sol. Un dispositif expérimental a été conçu à l'université de Strasbourg pour estimer ces coefficients dans des conditions de laboratoire contrôlées. Le dispositif expérimental utilise une colonne de sol comprenant un ensemble de capteurs d'humidité et de température pour déterminer les gradients d'humidité et de température, ce qui permet d'estimer les diffusivités de l'humidité. Les valeurs des diffusivités de l'humidité peuvent ensuite être utilisées dans des simulations numériques pour simuler le comportement des systèmes géothermiques peu profonds tels que les échangeurs air-sol sous des gradients de température et d'humidité variables. De plus, la variation des gradients d'humidité et de température permet la mise en œuvre de propriétés thermophysiques variables du sol dans les simulations.

Amélioration des performances d'un panneau photovoltaïque-thermique refroidi par air en utilisant des générateurs de vortex et un modèle de contrôle prédictif économique

Ugo Pelay^{1,*}, Lucien Etienne², Serge Russeil¹, Hassan Karkaba¹, Jules Simo Tala¹, Jacques Boonaert², Daniel Bougeard¹, Stephane Lecoeuche²

* ✉ : ugo.pelay@imt-nord-europe.fr

¹ Centre for Energy and Environment (France)

² Centre for Digital Systems (France)

Mots clés : Panneau photovoltaïque, thermique, Générateurs de vortex, Modèle Economique de Contrôle Prédictif, Simulation volumes finis

Résumé :

La performance d'un système Photovoltaïque/Thermique (PVT) est définie par deux principaux facteurs : la puissance électrique générée par le module Photovoltaïque (PV) et la puissance thermique extraite du module thermique. Pour augmenter la production globale d'énergie, des générateurs de vortex (VGs) ont été ajoutés pour intensifier les transferts convectifs et une stratégie de Modèle Economique de Contrôle Prédictif (EMPC) mise en place. Dans cette étude, des simulations volumes finis ont permis de déterminer les corrélations de pertes de charge et d'échanges nécessaires à la construction d'un modèle dynamique sous Dymola de PVT amélioré (avec VG). Celui-ci a ensuite été utilisé via Matlab/Simulink avec un contrôleur EMPC. Des simulations sont réalisées avec des journées types d'été et d'hiver dans le nord de la France, avec deux scénarios d'utilisation d'énergie : (i) sans récupération de chaleur (NHR) et (ii) avec récupération de chaleur (HR). Les résultats ont montré que lorsque l'on utilise un contrôleur EMPC avec un scénario de récupération de chaleur, le gain d'énergie augmente de 174 % et 234 % respectivement pour les cas de canal lisse standard et celui du cas amélioré avec générateurs de vortex.

Etude énergétique et environnementale des systèmes de production d'eau chaude sanitaire en France : lequel du chauffe-eau thermodynamique ou du chauffe-eau solaire est le plus soutenable ?

Régis Olivès^{1,*}, Jean-Marie Mancaux¹

* ✉ : olives@univ-perp.fr

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (France)

Mots clés : Eau chaude sanitaire, Chauffe eau thermodynamique, Chauffe eau solaire

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 représentent 51 % des systèmes de production d'ECS en fonctionnement avec une consommation d'environ 20 TWh. Selon un scénario de RTE [1], l'électrification des usages et le remplacement des cumulus électriques par des chauffe-eau thermodynamiques conduiraient à réduire à environ 16,5 TWh, soit une économie d'énergie de 3,5 TWh. D'autre part, les chauffe-eau solaires contribuent actuellement à économiser environ 2,4 TWh. Or si l'on se fixe comme objectif d'atteindre la moyenne européenne en termes de nombre de systèmes installés par habitant, il nous faudrait multiplier par un facteur 3 le nombre de chauffe-eau solaires [2]. Ceci correspondrait donc à une économie de 7,2 TWh, soit une économie 2 fois plus importante que ce que prévoit RTE. Nous comparons pour l'ECS dans l'habitat à l'échelle de la France un scénario d'électrification des usages thermiques à un scénario de développement du solaire thermique en termes énergétique et environnemental. L'impact de ces systèmes est évalué sur la base d'émissions de CO₂, de consommation d'énergies non renouvelables et d'épuisement des ressources matérielles naturelles. Une précédente étude avait montré le caractère frugal du chauffe-eau solaire [3]. Nous déterminons ici les demandes d'énergies non renouvelables et de matériaux non recyclés cumulées sur l'ensemble du cycle de vie de ces différents systèmes en focalisant notre attention sur le chauffe-eau thermodynamique et le chauffe-eau solaire. Il s'agit d'estimer l'influence sur les résultats de différents paramètres tels que le taux de recyclage des matériaux, l'énergie du recyclage, le contenu CO₂ de l'énergie électrique, la situation géographique... On montre ainsi l'intérêt du recyclage et on quantifie les émissions de CO₂ associées à la production d'eau chaude sanitaire. Un véritable gain aussi bien environnemental qu'énergétique pourrait être obtenu en favorisant davantage le chauffe-eau solaire. [1] Consommation d'électricité - Les usages chauffage, production d'eau chaude sanitaire et climatisation/ventilation dans le secteur résidentiel, GT Consommation d'électricité - RTE 2019 [2] Baromètre solaire thermique et solaire thermodynamique - EUROBSERV'ER - juillet 2023 [3] Matériaux pour la transition énergétique : cas de la production d'eau chaude sanitaire. R. Olivès, J.-M. Mancaux, Congrès SFT 2023

Comparaison des performances d'une DSC à flux de chaleur et d'une DSC à compensation de puissance pour l'étude des changements de phase de paraffines

Lydia Ferdjallah¹, Magali Fois^{1,*}, Laurent Ibos¹

* ✉ : fois@u-pec.fr

¹ Centre d'Etudes et Recherches en Thermique, Environnement et Systèmes [Créteil] (France)

Mots clés : Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC), Changements de phase, Paraffines

Résumé :

La DSC à compensation de puissance mesure directement le flux de chaleur entre deux fours indépendants, alors que l'Analyse Thermique Différentielle (ATD) mesure la différence de température entre un échantillon et une référence dans un seul four. La DSC à compensation de puissance fournit des valeurs d'énergie plus précises grâce à une sensibilité et une exactitude plus grandes.

Dans cette étude, deux paraffines, la RT28HC commercialisée par Rubitherm et le PCM28-Slurry de MicroCaps, dont la température de fusion est d'environ 28°C, ont été caractérisées par ces deux techniques préalablement étalonnées. Chaque paraffine a été soumise à un cycle de chauffage/refroidissement à deux vitesses différentes : 10°C/min et 0,5°C/min.

Nos conclusions principales sont :

1. Des températures d'onset de pic de fusion différentes.
2. Des pics moins larges en DSC à compensation de puissance.
3. Des valeurs d'enthalpies de changement de phase différentes entre technique et variant plus fortement avec la vitesse en ATD.
4. Des températures de cristallisation apparaissant à des températures plus basses en ATD.
5. Une forme du pic de cristallisation pouvant avoir une forme inattendue en remontant en température en ATD, ce qui n'est pas observé en DSC à compensation de puissance.

En ATD, à cause de l'exothermie de la cristallisation, une augmentation de la température est mesurée lors du refroidissement ; cette augmentation de température n'est pas observée en DSC à compensation de puissance puisqu'elle pilote la puissance afin de garder un écart de température nul entre l'échantillon et la référence.

Dans la littérature, les températures et les enthalpies de changement de phase peuvent varier selon les appareils, les conditions de mesure et d'analyse.

Etude des mécanismes de transitions de phases réversibles solide - liquide de matériaux à changement de phases

Caroline Coin^{1,*}, Philippe Legros², Samia Ben Ali³, Diego Baresch¹, Marie-Marthe Groz¹, Jean-Christophe Batsale¹, Alain Sommier¹, Fouzia Achchaq¹

* ✉ : caroline.coin@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France)

² Plateforme Aquitaine de Caractérisation des Matériaux (France)

³ University of Gabes, National School of Engineers of Gabes, Research Laboratory of Process Engineers and Industrial Systems (LR11ES54)

Mots clés : Matériaux à Changement de Phases, Transition de phase

Résumé :

L'intérêt des industriels pour les Matériaux à Changement de Phases (MCPs) est indéniable et toujours d'actualité en raison de leur haut potentiel pour des applications liées au stockage et à la régulation thermiques, par chaleurs combinées sensible et latente. Cependant, les problématiques qu'ils posent lors de leur intégration dans des matrices pour concevoir des composites (fuites lors de la fusion, incompatibilités chimique et/ou physique avec la matrice, faible conductivité thermique etc.) ralentissent, voire freinent, leur mise sur le marché malgré les très nombreuses études et publications disponibles sur ce sujet. Les travaux présentés ici résument les résultats sur les mécanismes de transitions de phases réversibles solide / liquide de Matériaux à Changement de Phases (MCPs) basse température ($< < 100^{\circ}\text{C}$) obtenus dans le cadre de la thèse de C. Coin. L'objectif principal est de comprendre le comportement thermique des MCPs de nature organique afin de faciliter et d'accélérer la conception de composites à base de MCPs performants. En effet, la conception de ces derniers implique généralement un MCP et un support (matrice fibreuse ou poreuse, matrice avec encapsulation de MCPs, etc.) et se fait par méthode essais-erreurs. Cette méthode reste trop chronophage et ne permet pas finalement de comprendre le réel comportement des matériaux une fois qu'ils sont soumis à des sollicitations thermiques et mécaniques. Trois MCPs de sources différentes, fossile et biosourcée, ont été ainsi choisis avec des propriétés thermiques semblables pour une température de transition solide - liquide autour de 60°C afin de faciliter la comparaison. Des essais pour comprendre les mécanismes de transitions aux échelles micro- et macroscopiques ont été mis en place pour compléter ceux plus standards de caractérisation de ces MCPs seuls, puis en présence d'un tissu de fibre de verre et ensuite d'une matrice biosourcée issue de déchets agricoles. Ces essais utilisent, entre autres, un microscope électronique à balayage (MEB) couplé à une platine chauffante, un dispositif de lévitation acoustique. Les protocoles mis en place ainsi que les résultats obtenus sont présentés ici.

Etude d'un système de récupération de chaleur sur eaux grises couplé à un chauffe eau thermodynamique

Jean-Baptiste Bouvenot^{1,2,*}, Cyprien Beaudet²

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

¹ ICube laboratory, University of Strasbourg, France (France)

² INSA Strasbourg (France)

Mots clés : Eaux grises, Récupération de chaleur, Chauffe eau thermodynamique

Résumé :

Cette étude vise à évaluer l'impact du couplage entre un chauffe-eau thermodynamique et un récupérateur de chaleur sur eaux grises et à en évaluer les performances en comparaison à un cas de référence (chauffe-eau électrique) sur la production d'eau chaude sanitaire. Cette étude se base d'abord sur une étude expérimentale permettant d'établir des modèles théoriques prenant en considération les effets dynamiques et l'encrassement de l'échangeur. Un modèle de type "carte de performance" est utilisé pour la pompe à chaleur. Enfin, le ballon est modélisé via un modèle stratifié issu du logiciel TRNSYS. Les résultats montrent un impact significatif de l'encrassement sur les performances de l'échangeur mais des gains importants sur les consommations énergétiques (> 50 %). L'impact du préchauffage de l'eau froide sur le coefficient de performance de la pompe à chaleur est sensible (- 10 % environ) mais le gain énergétique global de la combinaison de ces 2 technologies reste significatif.

Comparative investigation of methods for incorporating real climate data into thermal quadrupoles models : fitting techniques, integral transforms, and inversion algorithms

Mostafa Mortada^{1,*}, Laurent Ibos¹, Vincent Feuillet¹, Kamel Zibouche²

* ✉ : mostafa.j.m@hotmail.com

¹ Centre d'Etudes et Recherches en Thermique, Environnement et Systèmes [Créteil] (France)

² Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (France)

Mots clés : Thermal quadrupoles method, Inversion algorithms, Finite element method, Building walls with multiple layer composition

Résumé :

Solving the heat equation is a necessity in numerous applications, and the methods available for this purpose range from simple analytical resolutions (for a suitable set of assumptions) to more sophisticated numerical ones (complex geometries, non-linear problems...). The thermal quadrupoles method provides the advantage of expressing the partial differential formulation of the heat equation as a linear system in transformed time (Laplace transform) and space (integral transforms) domains. The following work concerns the incorporation of climate data recordings of hourly external temperature and solar heat flux in the thermal quadrupoles method for solving the heat equation through a building wall. To allow their transformation into the Laplace domain, the climate data (which exhibit severe fluctuations and peaks) are fitted by means of two techniques, namely, a Fourier series fit and Gaussian-Lorentzian asymmetric lineshapes. The considered problem corresponds to building walls of multiple layer composition. The wall is modelled as a cylinder, allowing a 2D axisymmetric representation in cylindrical coordinates which in turn dictates the need for Hankel transforms for the space domain. Moreover, this application of both time and space transforms while including fitted functions of real climate data raises the question of the proper inversion method to return to the original time-space domain after solving the quadrupole equations. Stehfest, De Hoog and Den Iseger algorithms are therefore investigated. Results of different combinations of the fitting method/inversion algorithm (or a coupling of algorithms) are provided and compared against a finite element resolution of the problem (COMSOL). This work is carried out within the framework of the Resbiobat project funded by the French national research agency (ANR).

Caractérisation des MCP microencapsulés en suspension

Maxime Leroy^{1,*}, Christel Métivier¹, Nicolas Louvet¹, Yves Jannot¹

* ✉ : maxime.leroy@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Matériaux à changement de phase, MCP microencapsulés, Chaleur latente

Résumé :

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux matériaux à changement de phase (MCP). Ces matériaux apportent un élément de réponse aux problématiques actuelles de stockage/déstockage de l'énergie. En effet, durant la transition de phase du MCP, la chaleur latente que celui-ci absorbe ou relâche est nettement plus importante que la chaleur sensible. Cependant, le taux de transfert de cette énergie est limité, étant donné que les MCP sont caractérisés par une faible conductivité thermique (0.1-0.4 W/(m.K)) [1]. Pour pallier ce problème, une solution est d'augmenter la surface d'échange de chaleur pour un volume de MCP donné, via la division et l'encapsulation de celui-ci. Une manière d'utiliser les particules ainsi obtenues est de les placer en suspension dans un fluide caloporteur, permettant alors la mise en écoulement du système. Les suspensions de MCP encapsulés bénéficient d'un regain d'intérêt ces dernières années [2], nécessitant une caractérisation poussée de leur propriétés thermophysiques. Nous proposons une caractérisation complète des propriétés thermophysiques à l'échelle macroscopique d'une suspension aqueuse de MCP microencapsulés (MCPm). Ces travaux portent dans un premier temps sur une étude via calorimétrie des propriétés thermiques du MCP seul et de la suspension de MCPm. Les expérimentations ont permis la détermination précise des températures qui sont associées au changement de phase du matériau. Nos résultats soulignent le rôle déterminant et initiateur de la membrane sur le processus de cristallisation du MCP, cette dernière favorise la nucléation hétérogène du matériau [3], provoquant l'élargissement de la plage de température de solidification. En outre, nous vérifions comme attendu que la mise en suspension des MCPm dans une phase aqueuse permet une nette augmentation de la capacité thermique, comparativement au MCP pur. Par ailleurs, nous avons mené une étude densimétrique qui a également permis de mettre en évidence le changement de phase du matériau. En effet, nous remarquons durant celui-ci que la densité de la suspension varie de manière abrupte. Cette variation, à intervalle de température équivalent, s'avère environ treize fois moins importante lors des mesures effectuées en dehors de la plage de température de transition de phase. Finalement, la rhéologie de la suspension a été étudiée. Nous observons un caractère rhéofluidifiant de la suspension d'autant plus marqué que la concentration en particules augmente. Indépendamment de cette concentration, il semble que l'état physique (solide/liquide) du PCM présent dans la suspension n'ait pas un rôle prépondérant sur la viscosité du matériau. Mots clefs : matériaux à changement de phase, chaleur latente, transition énergétique, encapsulation, suspension.

[1] P. Cheng et al., Different dimensional nanoadditives for thermal conductivity enhancement of phase change materials : Fundamentals and applications, Nano Energy, 2021.

[2] M. Jurkowska et al., Review on properties of microencapsulated phase change materials slurries (mPCMS), Applied Thermal Engineering, 2015.

[3] B.Xie et al., Crystallization Behaviors of n-Octadecane in Confined Space : Crossover of Rotator Phase from Transient to Metastable Induced by Surface Freezing, J. Phys, 2008.

Study of the Influence of Cooling Rate on Water Supercooling

Jawad Rabbi^{1,*}, Gholamhossein Kahid Baseri¹, José Luiz Lara Cruz¹, Magnus Rotan², Ragnhild Sæterli², Jorge Salgado Beceiro², Fride Vullum-Bruer², Alexis Sevault², Jean-Pierre Bédécarrats¹

* ✉ : jawad.rabbi@univ-pau.fr

¹ LaTEP, Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (France)

² SINTEF Energy Research, Postboks 4761 Torgarden, 7465 Trondheim, Norway (Norvège)

Mots clés : Supercooling, Phase Change Materials, Cooling Rate, Computational Fluid Dynamics

Résumé :

Supercooling occurs when a liquid does not crystallize although its temperature is below the liquid–solid equilibrium temperature (melting temperature). Supercooling phenomenon is an attribute of some phase change materials which can have a negative impact on the overall performance of energy storage/retrieval process. The factors involved in influencing the nucleation process such as volume of the sample, thermal history, cooling rate and surface roughness of the container need to be studied in detail to better understand this problem. Few researchers have addressed supercooling in depth due to the erratic nature of the phenomenon, and there is no consensus in literature about the effect of some parameters. This is the case for the influence of the cooling rate, which is studied in our research. The effect of cooling rate is investigated using water samples immersed in a bath containing a temperature-controlled fluid. The samples have a volume of 3 ml in cylindrical tubes having diameter of 10 mm. The measurement of supercooling being usually performed using temperature sensors, the impact of their position on the degree of supercooling of the phase change materials (PCM) is considered in this work. The first objective is to infer to which extent the location of thermocouple can affect the degree of supercooling. Two different cases are considered for evaluating the impact of thermocouples on the supercooling phenomenon by placing the thermocouple inside the PCM sample and outside the sample. After establishing the right protocol, the effect of cooling rate is studied. The first results show that varying cooling rate from 1°C/min to 0.08°C/min has no significant effect on degree of supercooling. Thermal gradient within the water samples is also studied by using both experimental setup and a CFD model. The goal is to determine the most accurate value of the supercooling.

Stability analysis of Calcium chloride hexahydrate inorganic phase change material

Hamza Ayaz^{1,*}, José Luiz Lara Cruz¹, Jorge Salgado Beceiro², Magnus Rotan², Ragnhild Sæterli², Fride Vullum-Bruer², Alexis Sevault², Jean-Pierre Bédécarrats¹

* ✉ : hamza.ayaz@univ-pau.fr

¹ LaTEP, Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (France)

² SINTEF Energy Research, Postboks 4761 Torgarden, 7465 Trondheim, Norway (Norvège)

Mots clés : Phase change material, Calcium chloride hexahydrate, Thermal stability, Phase stratification

Résumé :

Calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) is a potential thermal battery material that stores/retrieves energy during phase transition for thermal energy storage applications. The $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ is an inorganic phase change material (PCM), salt hydrate, that is commercially available and widely utilized in several thermal energy storage applications due to its high energy density, non-hazardous nature, and cost-effectiveness. The primary issue linked with $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ is phase stratification. The phase stratification is more pronounced with time and temperature which results in varying the thermal properties and phase equilibrium of the $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. This study is performed to prepare $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ PCM from dry CaCl_2 and investigate its thermal stability for thermal energy storage applications. The phase change equilibrium temperature and latent heat of fusion of the prepared sample were compared to the commercial product of Sigma Aldrich. The Differential Scanning Calorimetry (DSC) thermograph for the prepared sample shows the onset phase change equilibrium temperature of 30.6 ± 0.2 °C and the latent heat of fusion is 177 ± 2 J/g, whereas the thermal properties of the commercial $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were 30.4 ± 0.2 °C and 184 ± 2 J/g. The stability investigation includes thermal stress test (impact of temperature on thermal properties variation and phase stratification) and corrosion analysis (compatibility of storage tank material). The thermal stress experiment was performed for 90 days where the PCM under study was exposed to a controlled temperature environment at 50 °C. The result reveals the sample was stable for the first 30 days and no phase stratification or variation in thermal properties was observed. Whereas, after 30 days a significant change in the thermal properties was evident. The results presented can be valuable for the research community working with $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ thermal batteries for thermal energy storage applications.

Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with various renewable energy sources

Rima Aridi^{1,*}, Mona Aridi¹, Marie-Lise Pannier¹, Thierry Lemenand¹

* ✉ : rima.aridi@univ-angers.fr

¹ LARIS EA 7315 (France)

Mots clés : Renewable energy sources, Economic impact, environmental impact, social impact

Résumé :

This study compares five different renewable energy sources, focusing on their economic, environmental, and social impacts. The Levelized Cost of Energy (LCOE) and Environmental Cost Indicator (ECI) are used for economic and environmental evaluations, respectively. Results indicate LCOE values of approximately 0.048, 0.033, 0.067, 0.048, and 0.089 €/kWh for solar, wind, biomass, hydropower, and pumped storage, respectively. Environmental impacts are measured at around 0.0104, 0.0045, 0.0019, 0.0004, and 0.0180 €/kWh for the same sources.

Stockage de chaleur thermochimique : expérimentation de différents matériaux composites innovants

Elise Bérut¹, Michel Ondarts¹, Laurence Bois², Jonathan Outin¹, Nolwenn Le Pierrès^{1,*}

* ✉ : nolwenn.le-pierres@univ-smb.fr

¹ LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (France)

² Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces (LMI)

Mots clés : Stockage de chaleur, Sel thermochimique, Sorbants composites, Polyéthylène glycol

Résumé :

Le stockage de la chaleur est un enjeu majeur pour le développement des énergies renouvelables et de récupération, qui sont souvent variables voire discontinues. Le stockage par voie thermochimique est une solution d'avenir, car il permet un stockage sur des périodes aussi longues que désirées avec une densité énergétique élevée. Des sorbants composites à base de silice, de polyéthylène glycol (PEG) et d'un sel thermochimique ont été synthétisés. Leurs performances en matière de stockage de la chaleur ont été étudiées dans un réacteur à lit fixe ouvert, à l'échelle laboratoire, dans les conditions d'intérêt pour une application de stockage de la chaleur fatale issue des rejets des moteurs thermiques pour le chauffage de la cabine des camions. Ces composites ont été cyclés pour vérifier leur stabilité et évaluer leur cinétique et leur capacité de sorption, ainsi que leur densité énergétique de stockage. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec de la zéolithe 13X, matériau de référence pour ce type de technologie, et se sont révélés prometteurs pour certains des composites testés dans le cadre de l'application choisie.

Écoulement convectif d'un nanofluide dans un canal à parois ondulées équipé de sources de chaleur et d'un obstacle solide sous l'effet d'un champ magnétique localisé

Nawal Guerroudj^{1,*}, Abdelhamid Kheiri²

* ✉ : nawal.guerroudj@usthb.edu.dz

¹ Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (University of Sciences and Technology Houari Boumediene)

² Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Canal ondulé, Nanofluide, Sources de chaleur, Champ magnétique, Obstacle solide

Résumé :

La présente communication porte sur l'intensification des transferts de chaleur par couplage de méthodes active et passive. La méthode passive intervient au niveau de la configuration géométrique considérée et la méthode active intervient dans le choix du fluide : nanofluide magnétique. Une étude numérique a été effectuée pour explorer les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur d'un nanofluide Al_2O_3 /eau dans un canal à parois ondulées présentant un rétrécissement à l'entrée et équipé de trois sources de chaleur maintenues à une densité de flux constante et organisées alternativement sur les parois supérieure et inférieure. Un obstacle solide de section circulaire est placé au centre, au même niveau que la deuxième source, tandis qu'un champ magnétique uniforme est appliqué localement dans la dernière partie du canal où se trouve la troisième source. Les équations gouvernantes et les conditions aux limites associées sont résolues numériquement au moyen de la méthode des volumes finis. L'étude paramétrique se concentre sur l'impact du taux d'ouverture à l'entrée du canal AR, du rayon de l'obstacle R et de l'intensité du champ magnétique exprimée par le nombre de Hartmann Ha. Les résultats révèlent une intensification du taux de transfert de chaleur avec l'augmentation de Ha et R et la diminution de AR.

Stockage d'énergie par pompage thermique low-tech à faible empreinte carbone en milieu minier : revue critique de la faisabilité du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches locales

Sullivan Durand^{1,*}, Didier Haillot¹, Daniel Rousse¹

* ✉ : sullivan.durand.1@ens.etsmtl.ca

¹ Ecole de Technologie Supérieure [Montréal] (Canada)

Mots clés : Pompage thermique, Stockage d'énergie, Multi, énergétique, Lit garni, Pulvérisation d'huile thermique

Résumé :

Le stockage d'énergie par pompage thermique multi-énergétique se positionne comme une solution privilégiée pour le stockage énergétique en milieu minier. L'intégration du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches extraites à proximité permettrait de réduire la période de retour sur investissement et l'impact environnemental du système. Cette revue examine la recherche actuelle sur ces systèmes et propose une analyse critique de la faisabilité de l'intégration du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches extraites localement.

Batterie de Carnot intégrée thermiquement au réseau de chaleur de l'Université de Liège

Elise Neven^{1,*}, Olivier Dumont¹, Olivier Thomé¹, Vincent Lemort¹

* ✉ : Elise.Neven@uliege.be

¹ Université de Liège (Belgique)

Mots clés : Batterie de Carnot, stockage électrique, pompe à chaleur, cycle de Rankine organique réversible

Résumé :

Avec l'augmentation de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables ces dernières années, il y a un besoin croissant de solutions de stockage d'énergie flexibles, rentables et efficaces pour atténuer l'écart entre l'offre et la demande d'énergie. En réponse à cette demande, la batterie de Carnot émerge comme une solution prometteuse en raison de sa longue durée de vie, de son analyse du cycle de vie favorable et de sa réduction de la dépendance aux terres rares par rapport aux batteries lithium-ion conventionnelles. Cependant, ses avantages sont contrebalancés par son efficacité relativement faible en termes de cycles de charge et de décharge. Cette technologie stocke l'énergie électrique sous forme de chaleur via une pompe à chaleur, cette chaleur est ensuite convertie à nouveau en électricité via une machine thermique. Grâce à l'intégration de flux de chaleur comme source de chaleur pour la pompe à chaleur, les batteries Carnot thermiquement intégrées sont capables de stocker de l'énergie avec un meilleur coefficient de performance, ce qui renforce l'attrait de la technologie et permet d'atteindre une efficacité de cycle plus élevée par rapport aux architectures de batterie Carnot traditionnelles. Cette étude se concentre sur la mise en place d'un banc d'essai visant à évaluer une batterie Carnot intégrée thermiquement au réseau de chaleur de l'Université de Liège. Le système repose sur l'utilisation d'une pompe à chaleur pour la charge et d'un cycle de Rankine organique pour la décharge. Une particularité de ce système est sa réversibilité, ce qui signifie que certains composants sont partagés entre le cycle de Rankine organique et la pompe à chaleur. Ces composants partagés comprennent les échangeurs de chaleur et les machines volumétriques. Le système offre trois modes opérationnels : charge thermique, décharge électrique et décharge thermique. Cette configuration permet à la fois le lissage des pics thermiques et électriques, ainsi que d'augmenter l'autoconsommation des sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux photovoltaïques. En mode de décharge électrique, la puissance nominale est de 6 kW_{el}, tandis qu'en mode de charge thermique, elle est de 90 kW_{th}. La consommation électrique maximale pendant la charge thermique est de 10,7 kW_{el}. En mode de décharge thermique, la puissance de sortie atteint 400 kW_{th}. Le système est composé de deux échangeurs de chaleur à plaques, de trois machines à spirale réversibles placées en parallèle, d'une pompe centrifuge, d'un accumulateur, d'une vanne de régulation pilotée et d'un stockage d'eau thermique stratifiée de 8 . Le stockage d'eau thermique stocke 100 kW_{th} pour une différence de température nominale (8 K) et 300 kW_{th} pour une différence de température maximale (20 K). Le système a été initialement dimensionné à l'aide d'un modèle de conception basé sur l'étude de cas.

Modélisation dynamique et validation expérimentale d'une batterie thermique à base de matériaux à changement de phase

Sabine Sochard¹, Ryad Bouzouidja², Anas Maftah², Alain Sempey², José Luiz Lara Cruz^{1,*}, Zakaria Aketouane³, Tessa Hubert³, Jean-Michel Reneaume¹

* ✉ : jose.laracruz@univ-pau.fr

¹ LaTEP, Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés, 64000 Pau, France (France)

² Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (France)

³ NOBATEK/INEF 4, Bordeaux (France)

Mots clés : Stockage d'énergie thermique, Eau chaude sanitaire, Chauffage basse température, Climatisation

Résumé :

Afin de limiter l'augmentation de la température mondiale, il est important de réduire l'impact environnemental de la production et de la consommation d'énergie. Selon l'Agence internationale de l'énergie, le secteur du bâtiment est considéré comme l'un des plus grands secteurs d'utilisation finale de l'énergie dans le monde. La demande croissante d'énergie augmente la pression sur l'environnement et l'un des principaux défis à relever pour réduire l'impact environnemental des bâtiments consiste à remplacer les combustibles fossiles par des ressources renouvelables. Le stockage de l'énergie thermique a fait l'objet d'une attention particulière ces dernières années car il est essentiel pour compenser la nature intermittente des énergies renouvelables en corrigeant le déphasage entre l'offre et la demande d'énergie. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux qui peuvent stocker de grandes quantités d'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Ce processus de changement de phase est réversible, ce qui permet de stocker et de libérer de l'énergie thermique à des températures relativement constantes. Par rapport au stockage par chaleur sensible l'utilisation de MCP offre plusieurs avantages significatifs tels qu'une densité de stockage de la chaleur plus élevée sur de petites plages de température. Par conséquent, l'utilisation du MCP peut contribuer à réduire la taille des systèmes de stockage de la chaleur, ce qui les rend plus adaptés aux applications résidentielles et commerciales. Le système de stockage à base de MCP imaginé dans le projet MCPBat est constitué d'un échangeur à plaques pouvant être chargé et déchargé simultanément. L'objectif du travail réalisé au LaTEP est de développer un modèle dynamique de ce stockage et d'un système solaire thermique combiné à une pompe à chaleur réversible, puis d'optimiser ce système complet sur des paramètres de conception. Le modèle développé intègre une façade solaire composée de panneaux thermiques non-vitrés (Batisol®), une pompe à chaleur réversible, des stockages avec des MCP, pour produire simultanément les besoins en climatisation, eau chaude sanitaire et chauffage basse température d'un bâtiment. Il décrit le comportement dynamique du système et permet de relier les variables d'état du système et ses paramètres de conception et de fonctionnement. Le modèle du stockage a ensuite été validé à partir de données expérimentales obtenues par l'I2M sur banc d'essai. Dans de futurs travaux, ce modèle sera utilisé pour optimiser le système de manière dynamique et déterminer les paramètres opératoires optimaux. Ces travaux de recherche s'intègrent au projet MCPBat, et impliquent la collaboration de plusieurs laboratoires, le LaTEP de Pau et l'I2M de Bordeaux, et de l'Institut pour la Transition Energétique (ITE) NOBATEK/INEF 4.

The relationship between efficiency and flow regimes for a chaotic heat exchanger.

Marwane Elkarii^{1,*}, Francesco Romano², Nouhaila Elhani¹, S. Amir Bahrani¹

* ✉ : marwane.elkarii@imt-nord-europe.fr

¹ Centre for Energy and Environment (France)

² Arts et Métiers ParisTech (France)

Mots clés : Chaotic heat exchanger, Helical coiled tubes, Convective heat transfer, Chaotic advection

Résumé :

Helical coiled tubes offer a combination of enhanced mixing and improved heat transfer, making them a subject of significant interest in various heat transfer applications. In these configurations, the fluid within the core undergoes a unique flow pattern where it moves toward the outer wall and then returns to the core, generating a secondary flow. However, due to the stabilizing influence of the secondary flow within helical coils, laminar flow can persist at significantly higher Reynolds numbers compared to flow in a straight pipe. Consequently, this leads to reduced stream-wise mixing, which in turn hampers the attainment of high rates of convective heat transfer. To address this issue, several studies have focused on disrupting the orderly laminar flow and introducing chaos into the system. Creating chaotic fluid trajectories within the laminar flow regime is an effective passive method for improving heat transfer, commonly referred to as chaotic advection. In this study, we generate chaotic advection within an alternating Dean flow. In the latter, every bend undergoes a 90° rotation in relation to its neighboring bend. This rotation causes the roll-cells to regenerate in a plane perpendicular to the preceding one, prompted by the centrifugal forces' realignment. This geometric disturbance primarily induces chaotic advection. The objective of this research is to characterize the chaotic heat exchanger in comparison to the helical one. A dedicated experimental setup was developed to assess the heat transfer characteristics. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were validated versus the experimental data. Direct Numerical Simulation (DNS) were employed to investigate the flow and heat transfer characteristics within both configurations. The open-source continuum mechanics suite OpenFOAM was used. To comprehend the performance of both geometries, we first analyzed the pressure drop and the global Nusselt number. Additionally, the study delves into the flow structure and behavior, exploring the laminar flow and its eventual transition to turbulent flow across a Reynolds number range of 200 to 30,000. Exploring the effect of chaotic advection on the enhancement of mixing efficiency.

Investigation sur les écoulements alternés liquide appliqués au chauffage rapide des piles à combustible

Mortada El Ahmadi Aroussi^{1,*}, Sylvie Begot¹, Valérie Lepiller¹, Guillaume Layes², Fabien Harel³

* ✉ : mortada.elahmadi@femto-st.fr

¹ Franche-Comté Electronique Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies (UMR 6174)

² IUT Nord-Franche-Comté, Université de Franche-Comté (France)

³ Université Gustave Eiffel (France)

Mots clés : Piles à combustible, Ecoulements alternés liquides, Gestion thermique, Stratégies de refroidissement

Résumé :

Les technologies à base d'hydrogène, comme les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) avec la technologie PEMFC, peuvent diminuer les émissions de carbone dans les transports pour contrer le réchauffement climatique. Toutefois, des défis persistent, notamment la gestion thermique et la réduction des coûts. Le démarrage à froid des piles à combustible PEMFC est particulièrement problématique en raison du gel de l'eau produite, impactant les performances. Une étude bibliographique a été menée et a permis de conclure que l'application des écoulements alternés permet d'améliorer la gestion thermique des dispositifs électrochimiques, notamment en ce qui concerne l'homogénéité de température et la réduction de la consommation énergétique. L'objectif envisagé à travers ma thèse est de poursuivre les études menées par le laboratoire FEMTO ST, portant sur l'étude des écoulements alternés appliqués au chauffage rapide des piles à combustible, dans des conditions de démarrage à froid. La gestion thermique adoptée est passive, exploitant la chaleur libérée par la pile à combustible pendant son fonctionnement pour la réchauffer au démarrage. Pour mener à bien nos travaux, nous avons développé un banc d'essais spécifique pour étudier l'influence d'un écoulement alterné/pulsé sur la température de pile lors de son démarrage. La prochaine étape est d'approfondir notre étude en caractérisant les échanges thermiques et les phénomènes fluidiques dans les plaques bipolaires, malgré la complexité de leur architecture et la difficulté d'instrumentation. Nous fabriquerons un échantillon en graphite simplifié mais représentatif pour étudier plus efficacement ces phénomènes physiques, en veillant à ce que les conditions d'écoulement correspondent à celles des plaques bipolaires de la pile utilisée sur le banc d'essais. Nous collecterons des données instantanées ou moyennes (vitesse, température, pression, etc.) pour établir empiriquement les coefficients de perte de charge et d'échange thermique convectif, en régime permanent et alterné. Différentes stratégies, impliquant le débit, la fréquence d'alternance, le rapport cyclique et la puissance de chauffage, seront examinées pour étudier tous les aspects thermo- fluidiques de l'écoulement. Ces données sont essentielles pour modéliser les échangeurs internes des piles à combustible. La modélisation résultante servira à développer des stratégies de chauffage visant à améliorer la dynamique et l'homogénéité thermique des piles à combustible, notamment pour les véhicules à pile à combustible (FCEV) lors des changements de charge et des démarrages à froid.

Thème 2

Modes de transfert

Etude expérimentale de l'influence du rayonnement sur la dynamique d'un écoulement turbulent de convection naturelle en cavité différentiellement chauffée	30
Etude expérimentale des mécanismes de conversion électromécanique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage	31
Numerical simulation of Stirling cycle heat pumps by simple adiabatic method	32
Etude expérimentale et numérique d'un incendie en tunnel en phase de construction	33
Caractérisation multi-échelle des propriétés thermiques et hydriques des matériaux de construction à base de briques en terre crue	34
Transient hygrothermal CFD model of Trombe wall system	35
Distributed thermoelectric model of a PV module : effect of inhomogeneous boundary conditions	36
Convection de double diffusion couplée au rayonnement, dans une cavité poreuse saturée par un fluide semi-transparent	37
Caractérisation expérimentale et modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un béton cellulaire	38
Natural convection flow of a nanofluid-filled W-shaped cavity	39
Analyse et modélisation d'un évaporateur solaire pour le traitement de déchets liquides	40
Mathematical Modeling of a Batch-Operated Bubble Column Humidifier for Seawater Desalination	41

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

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

* ✉ : vincent.daurenjou@ensma.fr

¹ Institut Pprime (France)

Mots clés : Convection naturelle, Ecoulement turbulent, Rayonnement

Résumé :

Les écoulements de convection naturelle sont des écoulements générés par la présence d'un gradient de masse volumique au sein d'un fluide souvent induit par un gradient de température et soumis à un champ de pesanteur. Ces écoulements sont très fréquemment observés dans la vie courante, par exemple lorsque de l'air ambiant est chauffé par un radiateur. Ils sont également présents dans de nombreux domaines industriels où ils peuvent jouer en particulier un rôle important pour l'optimisation des transferts thermiques fluide-paroi. La cavité différentiellement chauffée (CDC) correspond à l'une des configurations académiques couramment utilisées pour étudier les écoulements et les transferts dans une telle situation. Il s'agit d'une enceinte fermée parallélépipédique comprenant deux parois imposant un gradient de température. Elle possède plusieurs avantages : la géométrie de la cavité est simple, elle empêche tout transfert de masse provenant du milieu extérieur, le contrôle des conditions aux limites du système est bien assuré (c'est en particulier le cas de l'émissivité des parois). Ces deux derniers points sont essentiels pour l'étude de la convection naturelle. En effet, ceux-ci sont particulièrement sensibles aux conditions aux limites. De nombreuses études portant sur ce phénomène existent. Cependant, ce n'est que depuis récemment que le rayonnement des gaz est pris en compte avec des approches représentatives du comportement radiatif réel des fluides. A titre d'exemple, les études de Soucasse et al. (2014) et Djanna et al. (2008) ont mis en évidence son influence notable sur la dynamique de l'écoulement et les transferts thermiques associés. Néanmoins, dans le cadre d'écoulements fortement turbulents, il n'existe pas encore d'études expérimentales complètes portant sur ce sujet dans une cavité différentiellement chauffée verticale (gradient de température horizontal imposé). L'objectif général de ce travail est ainsi de caractériser expérimentalement les effets du rayonnement sur un écoulement de convection naturelle fortement turbulent ($Ra=1.2e11$). Cette étude s'inscrit dans la continuité du travail de Belleoud et al. (2018) qui ont étudié expérimentalement ces écoulements et les transferts associés en l'absence de rayonnement. La cavité différentiellement chauffée verticale utilisée dans cette étude mesure 3,84 m de haut, 1,0 m de long et 1,02 m de large. Avec cette cavité, une faible différence de température ($dT \simeq 20^\circ C$) suffit pour générer un écoulement fortement turbulent tout en respectant l'approximation de Boussinesq. Afin d'observer les effets du rayonnement sur l'écoulement, une comparaison est faite en modifiant les propriétés radiatives des parois adiabatiques de la cavité (émissivités). Tout d'abord, un film aluminisé d'émissivité $\varepsilon = 0.10$ recouvre ces dernières. Puis, le revêtement est enlevé et de la peinture noire est appliquée pour obtenir une émissivité valant $\varepsilon = 0.95$. La dynamique de l'écoulement est caractérisée grâce à la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) pour ces 2 cas et 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, ...) et de quantifier ainsi la contribution du rayonnement en situation réelle.

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

Kaoutar Taleb^{1,*}, Guillaume Castanet¹, Alexandre Labergue¹

* ✉ : kaoutar.taleb@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA (France)

Mots clés : Conversion électrothermique, Contrôle du givrage

Résumé :

Le givrage correspond à l'accrétion de glace après impact de gouttes d'eau sur des parois sous-refroidies. Ce phénomène touche de nombreux domaines et secteurs d'activités industriels. Des systèmes de lutte expérimentale des mécanismes de conversion électromécanique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage existent mais leur déploiement reste encore limité en raison de leur difficulté d'intégration (encombrement, robustesse et sobriété) ou de méconnaissances des mécanismes mis en jeu. Cette étude propose d'utiliser un actionneur plasma de type Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) qui permet une meilleure intégration. Les DBD sont des plasmas froids qui s'établissent à la surface d'un diélectrique et où une partie de la puissance électrique est convertie en chaleur. Dans cet article, nous proposons d'étudier le mode anti-givrage de l'actionneur plasma. Ce mode d'action de l'actionneur vise à interdire tout dépôt de glace sur la paroi après impact de gouttes. Cependant, les mécanismes mis en jeu lors de cette conversion électrothermique, et comment ils interagissent avec les gouttes impactantes, restent encore mal connus : contribution de l'échauffement du diélectrique (paroi) et de l'écoulement de convection naturelle induit. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'éclaircir le rôle de ces deux sources de chaleur. Pour y répondre, nous proposons de mettre en œuvre la thermométrie par imagerie de fluorescence induite par laser (PLIF) pour deux configurations différentes. La première configuration consiste en une analyse statique durant laquelle l'échauffement d'une goutte suspendue au-dessus du plasma est mesuré. Le cas de température ambiante est d'abord considéré avant de regarder le cas où l'ensemble (air ambiant et actionneur plasma) est refroidi jusqu'à -35°C environ grâce à une enceinte réfrigérée. Dans la seconde configuration, l'échauffement de la goutte est mesuré lors de son impact sur le diélectrique pour les deux mêmes cas que précédemment : température ambiante et ensemble refroidi à -35°C . Pour cette seconde configuration, un système de PLIF rapide (3000 images/s) est utilisé pour pouvoir décrire l'échauffement de la goutte pendant l'impact et juste avant.

Numerical simulation of Stirling cycle heat pumps by simple adiabatic method

Temesgen Assefa Minale^{1,2,*}, François Lanzetta¹, Sylvie Begot¹, Muluken Z Getie²

* ✉ : temesgen.minale@femto-st.fr

¹ Université de Franche-Comté, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France (France)

² Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Bahir Dar Institute of Technology, Bahir Dar University, Bahir Dar, Ethiopia (France)

Mots clés : Stirling, heat pump, simple adiabatic, pressure drop, regenerator imperfection and conduction loss

Résumé :

The building industry significantly increases energy consumption and emissions of greenhouse gases (GHG), particularly in residential areas, due to the power source that the buildings use fuel and hydrochlorofluorocarbon working fluids for heating and cooling applications. Therefore, the Stirling heat pump is a heating technology for residential and commercial buildings due to its natural working fluids. Several researches have been done on Stirling engines and cry coolers, but there is little attention to the Stirling heat pump development. A reliable numerical model shall be developed to estimate the power input, coefficient of performance, and other characteristics of a Stirling cycle heat pump and give valuable information for future research. The current study develops a numerical model called the simple model, which considers regenerator imperfection losses and conduction losses. This model is applied to the geometry of the FEMTO-60 engine to investigate the effect of different parameters on its performance. The simulation result shows the pressure drop in the regenerator, cooler, and heater at different crank angles, and it is maximum at the regenerator. The study also shows the effect of working fluid on its performance and compares the simple model with the ideal adiabatic and Schmidt Analyzes of the Stirling heat pump. The simulation results using Helium a working fluid at a pressure of 4.13 MPa indicate a COP of 1.2, 1.3 and 1.42 for simple, ideal adiabatic, and Schmidt analyses, respectively.

Etude expérimentale et numérique d'un incendie en tunnel en phase de construction

Côme Leclerc^{1,2}, Zoubir Acem², Rabah Mehaddi², Bertrand Masselin¹, Pascal Boulet^{2,*}

* ✉ : pascal.boulet@univ-lorraine.fr

¹ Société du Grand Paris (France)

² Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Incendie en tunnel, Dynamique du feu, Fire Dynamics Simulator (FDS), Maquette expérimentale

Résumé :

En phase de chantier un tunnel est souvent creusé à partir d'un puits, par lequel un tunnelier est mis en place au niveau de la galerie à creuser et avance progressivement sur une longueur allant parfois jusque plusieurs kilomètres. En cas d'incendie pendant cette phase, plusieurs spécificités rendent la gestion du feu et des fumées différente d'un cas de tunnel en phase d'exploitation. La ventilation est généralement arrêtée lorsque le sinistre est détecté. Largement étudiés pour les tunnels en phase d'exploitation, ces problèmes sont beaucoup moins documentés en phase de chantier. Nous avons réalisé une étude de la dynamique du feu et des fumées en partenariat avec la Société du Grand Paris dans le cadre des travaux réalisés sur le projet Grand Paris Express. Nous avons conçu pour cela une maquette et analysé les résultats de simulations numériques réalisées à l'aide du code spécialisé Fire Dynamics Simulator (FDS). Nous avons considéré un tronçon de galerie horizontale, fermée d'un côté et ouverte de l'autre sur un espace représentant son puits de descente. Le feu et les fumées sont produits par un foyer de type bac d'heptane, dont on mesure la perte en masse de combustible pour accéder à la puissance du feu. Le champ de température est reconstruit dans la galerie et le puits grâce à des thermocouples répartis sur des perches verticales implantées sur sept positions longitudinales, permettant d'analyser la position des fumées et leur évacuation. La puissance du foyer et sa position par rapport à la sortie sont des paramètres importants dont l'influence a été analysée. Les résultats sont transposables en vraie grandeur avec l'application des règles de similitude. Dans la configuration géométrique considérée en vraie grandeur (galerie de diamètre 8,70m, longueur 500m, puits de descente cubique de côté égal à 30m), nous observons par exemple que la puissance maximale du foyer ne dépasse pas 10 MW en raison de la sous-oxygénation. Il existe en aval du foyer une hauteur libre de fumées de l'ordre de 40 % de la hauteur totale du tunnel avec une couche de retour depuis la sortie qui alimente partiellement le foyer en oxygène. Les fumées s'évacuent du côté du puits de descente sous la forme d'un panache déversant, qui laisse libre de fumées le côté du puits opposé au tunnel. Cette évacuation des fumées est cruciale pour l'accès des secours en cas de problème. Nous avons également étudié l'effet du vent sur le panache de fumées en sortie de puits. Un vent, même modéré avec une vitesse moyenne de 16km/h, soufflant horizontalement au-dessus du tunnel, perturbe significativement le régime d'écoulement, provoquant une recirculation des fumées dans le puits et le remplissage des zones initialement non enfumées. L'article complet proposera une description de la maquette et de sa métrologie, la configuration des calculs sous FDS, leur validation par comparaison avec les données expérimentales et un ensemble de résultats représentatifs de la dynamique du foyer et des fumées : puissances dégagées et champs de température, de vitesses et de concentrations.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-067>

Caractérisation multi-échelle des propriétés thermiques et hydriques des matériaux de construction à base de briques en terre crue

Sara Chehade¹, David Giovannacci², Nicolas Dujardin¹, Abdel Boudenne^{1,*}

* ✉ : boudenne@u-pec.fr

¹ Centre d'Etudes et Recherches en Thermique, Environnement et Systèmes [Créteil] (France)

² Laboratoire de recherche des monuments historiques (France)

Mots clés : Terre crue, Propriétés hygrothermiques, Transfert de chaleur et de masse

Résumé :

Le confort du milieu intérieur des bâtiments est devenu un critère aussi important que la considération environnementale lors du choix des matériaux de construction. La terre crue, matériau ancestral à faible impact environnemental, suscite un intérêt croissant pour ses propriétés thermiques et hygrothermiques. L'objectif de cette étude est de caractériser les propriétés thermophysiques et hydriques d'une formulation de brique en terre crue (BTC), dans le but de mieux comprendre son potentiel et sa capacité à substituer les matériaux de construction classiques et analyser le transfert couplé de chaleur et de masse. La brique sélectionnée provient d'une briqueterie en Picardie où l'extraction et la transformation des argiles se font sans processus chimique et à faibles coûts énergétiques. Pour mieux comprendre les performances thermiques de la BTC dans le cadre de la construction, des mesures des propriétés thermophysiques (chaleur spécifique, conductivité et diffusivité thermique) en fonction de la variation de la température (10 à 40°C) et de l'humidité relative (10 % à 80 % HR) ont été réalisées. Les résultats ont montré que lorsque l'humidité relative augmente de 10 % à 80 %, la conductivité thermique de la BTC augmente de 0,9 à 1,2 W/mK. Cependant, aucune différence notable n'a été observée pour les variations de des propriétés thermophysiques dans la plage de température allant de 10°C à 40°C. Par la suite, un mur en BTC de 50 x 50 x 10 cm³ a été construit pour étudier son comportement hygrothermique dans des conditions dynamiques, évaluant ainsi son efficacité énergétique comme enveloppe de bâtiment. Le mur a été placé dans une chambre bi-climatique reproduisant des variations de température et d'humidité sur les deux côtés opposés de la paroi simulant les conditions environnementales intérieures et extérieures. De plus, une dizaine de capteurs de température et d'humidité relative ont été positionnés à différentes profondeurs de la paroi en BTC. Un scénario de température, reproduisant un épisode caniculaire sur plusieurs jours, a été appliqué. Les mesures des profils de variation de la température au sein de la paroi ont montré une reproductibilité entre les cycles ainsi qu'une absence d'effet de dérive. En conclusion, la terre crue présente des propriétés thermiques et hydriques très intéressantes et peut contribuer à la construction de bâtiments à haute performance énergétique. Des études complémentaires impliquant des simulations numériques et d'autres scénarios sont en cours pour une meilleure compréhension du comportement hygrothermique de ce matériau de construction.

Transient hygrothermal CFD model of Trombe wall system

Nour El Zein^{1,*}, Yacine Ait Oumeziane¹, Sylvie Begot¹, Valérie Lepiller¹, Philippe Desevaux¹

* ✉ : nour.elzein@femto-st.fr

¹ FEMTO-ST Institute, Université de Franche-Comté, CNRS, Belfort, France (France)

Mots clés : Trombe Wall, Transient CFD Modeling, Hygrothermal Behavior, Thermal Comfort

Résumé :

In the context of the current worldwide energy situation, the building sector stands as a substantial contributor to worldwide energy consumption and the emission of greenhouse gases. To improve the building's energy performance and hygrothermal comfort, it is crucial to adopt renewable energy resources and eco-friendly engineering solutions. Among various technologies, Trombe walls, are recognized as a cost-effective solution to reduce energy consumption. However, the performance of this type of system is highly sensitive to external weather conditions and depends on its configuration and management. Drawbacks such as overheating, reverse thermocirculation, and low thermal resistance occur mainly in severe weather conditions where the temperature differential and the amount of water vapor in the air may be considerably high. Consequently, a careful selection and evaluation of Trombe wall design parameters is required for each climatic zone. Several theoretical and experimental studies have been carried out to investigate the thermal behavior of Trombe walls under various weather conditions and evaluate the impact of its geometrical parameters on its overall thermal efficiency. However, to date, very few developed CFD models take into account the dynamic behavior of such a system, and most of the available models in the literature did not consider the effect of moisture on Trombe walls as the focus is often on the determination of its thermal efficiency. The objective of this study is to develop a transient CFD model representing the dynamic behavior of Trombe walls. The CFD model is based on the geometric specifications of an existing Trombe wall test bench located at FEMTO-ST, which has dimensions of 1.5 meters in width and 1.95 meters in height. Since there is no a priori method for establishing optimal numerical parameters, mesh grid, and time step sensitivity analysis are first performed. Then, several user-defined functions and sources are programmed to take into consideration variable solar radiation as well as the presence of occupants and their activities. Finally, a methodology for investigating the impact of moisture on the hygrothermal comfort and the thermal performance of the Trombe wall is proposed.

Distributed thermoelectric model of a PV module : effect of inhomogeneous boundary conditions

Fadi Mehdi Bourarach^{1,*}, Arttu Tuomiranta², Stéphane Gibout¹

* ✉ : fadi.bourarach@univ-pau.fr

¹ Laboratoire de Génie Thermique Energétique et Procédés (EA1932)

² TotalEnergies (France)

Mots clés : Distributed thermoelectric model, Inhomogeneous boundary conditions, Finite volume model

Résumé :

The scarceness of the available sites for classical ground mounted due to the low power density of solar PV lead to the emergence of new PV systems with the aim to resolve the conflict with residential and agricultural needs as part of the SGD 7. Precise modeling of PV performance necessitates knowledge of the cell's temperature, and predicting this temperature becomes progressively more challenging due to their new design features, impacting the yield and therefore their return on investment. The existing thermal models that have been developed for conventional PV systems have several limitations, which lead to mitigated cell temperature estimations. Several studies show a varying distribution of convective heat exchange coefficient (h-coeff) on the PV installation depending on its geometrical configuration This implies the necessity to explore more advanced thermal approaches.

In this communication we introduce a coupled 5-layer inertial physical finite-volume model that incorporates a local distribution of h-coeff as input. It includes a 2D thermal model coupled to an electrical model in 2 ways, the first coupling resides in the classical thermal effect on the cell's efficiency and the second coupling considers the electrical connection layout of pv cells. The model is developed using opensource libraries such as PVlib and will be validated first numerically and experimentally. Numerically, by being compared with the validated sandia 1-layer model. Experimentally, using several controlled experiments on a single module and using data from PV installations deployed by TotalEnergies. These validations will be conducted with a constant h-coeff since it requires a developed model to estimate its spatial distribution. Indeed, this work constitutes a bridge towards a more detailed CFD model for PV installations.

Not focusing on the calculation of the h-coeff, as a first step, we will estimate the electrical power loss due to the non-homogeneous h-coeff distribution that will affect the electrical production in two ways, first by reducing the overall DC power and secondly by impacting the AC conversion efficiency due to voltage drop caused by the temperature increase .

Convection de double diffusion couplée au rayonnement, dans une cavité poreuse saturée par un fluide semi-transparent

Adel Taleb^{1,*}, Mohamed Boussaid¹, Haykel Ben Ahmed², Fethi Demim³

* ✉ : talebade173@gmail.com

¹ Laboratoire Dynamique des Moteurs et Vibroacoustique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université M'hamed Bougara (Algérie)

² Université de Picardie Jules Verne (France)

³ Ecole Militaire Polytechnique [Alger] (Algérie)

Mots clés : convection, rayonnement, cavité poreuse

Résumé :

Dans cette communication, nous réalisons une analyse numérique sur la convection de double diffusion couplée au rayonnement, dans une cavité poreuse chauffée différentiellement et saturée par un fluide semi-transparent. La résolution du problème est basée sur la méthode de discrétisation par différences finies, et la méthode implicite des directions alternées (A.D.I) pour résoudre les équations d'énergie et de masse. La méthode de sur-relaxation successive est utilisée pour résoudre l'équation de la quantité de mouvement. L'équation de transfert radiatif, qui permet de calculer le terme source radiatif, est résolue par la méthode des ordonnées discrètes. Sur la base de ces approches, les effets des paramètres de contrôle pertinents ont été examinés, tels que le nombre de Rayleigh, le nombre de Planck, l'épaisseur optique, le nombre de Lewis et le rapport des forces de poussée, sur la structure de l'écoulement et les transferts thermiques et de masse. Les résultats obtenus indiquent que le rayonnement thermique renforce le transfert de chaleur global, affaiblit le transfert convectif, mais n'a pratiquement aucune influence sur le transfert de masse. L'écoulement aidant est plus stable que l'écoulement opposant qui favorise la naissance des structures multicellulaires.

Caractérisation expérimentale et modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un béton cellulaire

Maram Bouazizi^{1,*}, Muhammad Yousaf Malik², Yacine Ait Oumeziane³, Nizar Ben Ezzine¹, Walid Oueslati¹, Philippe Desevaux³, Valérie Lepiller³, Fatima El Mankibi³

* ✉ : maram.bouazizi@fst.utm.tn

¹ Université de Carthage, Faculté des Sciences de Bizerte, LR19ES20 : Ressources, Matériaux, Et Ecosystèmes (RME)

² UFR STGI, Université de Franche-Comté, Belfort, France (France)

³ FEMTO-ST Institute, Université de Franche-Comté, CNRS, Belfort, France (France)

Mots clés : Béton cellulaire, Propriétés hygrothermiques, Transferts d'humidité

Résumé :

La caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction demeure superficielle dans les travaux issus de la littérature. En effet, la complexité des mécanismes de sorption (hystérésis et thermo dépendance) est très souvent non prise en compte. Ce travail de recherche est ainsi dédié, dans un premier temps, à la caractérisation expérimentale complète et à la modélisation des propriétés hygrothermiques d'un béton cellulaire. Les propriétés physiques, thermiques et hygriques sont identifiées et comparées aux résultats de la littérature existants. Cependant, ce travail de caractérisation nécessite des temps d'essais très longs puisqu'ils nécessitent d'atteindre les états d'équilibre. D'autre part, la réponse hygrothermique numérique d'échantillons de béton cellulaire soumis à des sollicitations hygrothermiques cycliques, définies selon le protocole NORDTEST, obtenue à partir d'un modèle de transferts d'humidité et de chaleur, est discutée et comparée aux résultats expérimentaux. A terme, l'objectif est d'exploiter ces résultats afin de pouvoir caractériser plus rapidement le comportement hygrothermique d'un matériau en s'appuyant sur la résolution du problème inverse de transferts à partir d'algorithmes d'optimisation.

Natural convection flow of a nanofluid-filled W-shaped cavity

Farah Zemani-Kaci^{1,*}

* ✉ : zemanifarah@live.fr

¹ Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (BP1505 El M'Naouar 31000 Oran Algérie)

Mots clés : Natural convection, Finite volume method, W shaped cavity

Résumé :

A two-dimensional numerical study of a laminar natural convection flow in a W-shaped cavity filled with CUO nanofluid has been conducted. The heat source is located on the lower wall with different heights $h = 0.6L, 0.7L, 0.9L$. This numerical study is developed to define the effect of different shapes of the hot wall with different heights $h = H/4$ and $H/2$. To analyze the thermal and dynamic fields and the heat transfer of the system, the finite volume method based on the SIMPLE algorithm was used to solve the permanent forms of the two-dimensional Navier-Stokes equations, as well as the conservation equations of mass and energy. The simulation explored how the Rayleigh number ($Ra=104$ to 106), nanoparticle volume fraction, as well as the geometry and height of the hot wall, affect the results. It is observed that the mean Nusselt number increases with an increase in Rayleigh number, nanoparticle volume fraction, resulting in an improvement in heat transfer, and decreases with increasing hot wall height.

Analyse et modélisation d'un évaporateur solaire pour le traitement de déchets liquides

Quentin Royer^{1,2,*}

* ✉ : quentin.royer@toulouse-inp.fr

¹ Institut de mécanique des fluides de Toulouse (France)

² Safetykleen (France)

Mots clés : évaporateur solaire, interface air eau, déchet liquide

Résumé :

Dans une démarche de gestion durable des déchets, nous avons entrepris le développement d'un jumeau numérique représentant une solution industrielle d'évaporation solaire destiné au traitement de déchets liquides principalement composés d'eau. Ce modèle ou jumeau numérique vise à prédire les performances thermiques et opérationnelles de l'évaporateur, permettant une approche prédictive et ainsi optimiser son fonctionnement. La première composante essentielle de notre modèle se focalise sur l'interaction entre l'air et l'eau à la surface du bassin. Dans un premier temps, nous avons considéré que le bassin est une surface chargée en vapeur d'eau, ce qui permet de simplifier l'approche physique. Le premier verrou est alors de correctement modéliser l'interaction entre la vitesse de l'air et celle de la surface. A cet effet, nous avons développé un nouveau modèle pour cette interaction, qui a été récemment publié (Royer et al. 2024). Afin de rendre le jumeau plus représentatif, nous avons commencé à intégrer le phénomène radiatif, principale source d'énergie du système, et vecteur de l'évaporation du bassin. Même s'il est en cours de développement sur la solution envisagée, des premiers résultats sont disponibles et seront présentés. A des fins de comparaison, les premières expérimentations à l'échelle industrielle ont été lancées pour valider les prédictions du modèle et évaluer les performances de l'évaporateur en conditions réelles grâce à un pilote dans lequel de multiples capteurs ont été installés. Des premiers résultats seront aussi explicités dans le cadre de la communication.

[Royer et al. 2024] Royer, Quentin, Romain Guibert, Pierre Horgue, Adam Swadling, et Gérald Debenest. 2024. « Air-water interface boundary condition for the numerical evaporation rate prediction of a horizontal water span under different convection regimes ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 226 (juillet) : 125438. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125438>.

Mathematical Modeling of a Batch-Operated Bubble Column Humidifier for Seawater Desalination

Fatima-Zahra Atlane^{1,2,*}, Mohammed Khalij¹, Ayoub Gounni², Abdelhamid Kheiri¹, Mustapha El Alami²

* ✉ : fatima-zahra.atlane@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

² LPMMAT, Département de Physique, Faculté des Sciences Aïn Chock, Université Hassan II, Casablanca, Maroc. (Maroc)

Mots clés : Desalination, HDH, Bubble column humidifier, Heat and Mass transfer, Multiphase flow

Résumé :

The development of innovative desalination techniques is crucial in response to the challenges posed by rapid urbanisation and growing pressures on freshwater supplies. This poster provides an overview of the potential of air humidification dehumidification systems (HDH), particularly when integrated with bubble column systems, to address these pressing issues. The poster outlines a mathematical model of a bubble column serving as a humidifier for desalination purposes. This study explores the fundamental aspects of bubble formation dynamics, including radial expansion and vertical rise, and discusses the forces influencing this process. Furthermore, it touches upon heat and mass transfer phenomena in the air-water system, aiming to contribute to the ongoing efforts to optimise desalination processes.

Thème 3

Modélisation et Simulation Numérique

Rénovation énergétique des bâtiments en Algérie	45
Modélisation spectrale des écoulements fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires	46
Simulation Numérique de la Convection Double Diffusive dans un Demi-disque 2D avec température inhomogène sur la voûte	47
Modélisation et simulation d'un cycle OTEC et étude d'un couplage avec un système de climatisation par eau de mer profonde (SWAC)	48
Apport des modèles réduits pour l'identification expérimentale de la diffusivité thermique des métaux liquides	49
Implémentation de résistances de contact en 2-D dans un circuit équivalent. Thermique d'une encoche statorique d'un moteur électrique	50
Résolution des transferts de chaleur par Monte Carlo dans une géométrie urbaine lors d'une vague de chaleur	51
Modélisation des transferts radiatifs avec fluorescence pour la quantification de biomarqueurs en neurochirurgie	52
Mise en place d'une méthodologie de construction de benchmarks pour la validation des modèles de microclimat urbain	53
Etude de la convection naturelle transitoire d'un fluide à grande thermodépendance en viscosité en configuration cylindrique	54
Etude expérimentale de l'effet de la rugosité sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide	55
Modèle zonal d'un échangeur avec changement de phase : formulation big M pour l'optimisation	56
Impact du cisaillement liquide-vapeur sur un écoulement diphasique à film tombant dans un échangeur de chaleur à plaques d'une machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	57
Emissivité hémisphérique d'une cavité isotherme cylindrique ou rectangulaire	58
Dimensionnement de fissures non débouchantes dans des pièces métalliques par thermographie laser	59
Etude expérimentale et numérique des déformations pariétales sur l'intensification des transferts de chaleur et du mélange dans un écoulement interne tubulaire	60
Démonstration de faisabilité : apprentissage faiblement supervisé pour la reconstruction a priori de SGE-T utilisant des corrélations en deux points	61
Etude par LES avec TrioCFD des modifications des structures turbulentes thermiques induites par les variations des propriétés thermophysiques de l'eau	62
Etude de la conductivité thermique des nanofils modulés de Silicium par la méthode de Monte Carlo combinée au formalisme de Green-Kubo	63
Etude de la combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro classique : Analyse des performances de combustion et impact sur les émissions polluantes	64
Modélisation analytique des transferts thermiques en régime permanent dans les parois ventilées à double peau grâce à la méthode des quadripôles.	65

Enhancing the Thermal Performance of Electric Cable-heated Pavement by Asymmetrical Thermal Insulation Coating : A Numerical Simulation Study	66
Génération procédurale de géométrie urbaine pour la thermique	67
Etude numérique du refroidissement de la maille élémentaire d'un milieu poreux homogène traversé par une suspension de microparticules à changement de phase	68
Numerical simulation of a Phase Change Material/Water Cylindrical Heat Exchanger : A Smart PCM Mobile Bathroom	69
Analyse numérique des flux radiatifs permettant de calculer la température moyenne radiante d'un piéton dans une rue canyon en été	70
Evaluation des propriétés thermiques des blocs d'argile compacts stabilisés avec des cendres de bois ou des déchets de poterie traditionnels	71
Développement et validation d'un outil de simulation numérique pour l'étude du masquage radiatif des brouillards multi-composants réactifs.	72
Spatiotemporal variability of solar radiations within an urban context : a characterisation by means of Principal Component Analysis	73
Anisothermal gas–particle flow simulations for concentrated solar applications	74
Analyse comparée de méthodologies de modélisation du couplage conduction-rayonnement au sein de matériaux poreux semi-transparents	75

Rénovation énergétique des bâtiments en Algérie

Habiba Kazeoui^{1,*}, Nadia Bakour¹, Sofiane Bourbia¹

* ✉ : habiba.kazeoui@univ-bejaia.dz

¹ Laboratoire de Génie de la construction et Architecture (LGCA)

Mots clés : Rénovation énergétique des bâtiments, Efficacité énergétique, Réglementation thermique

Résumé :

L'Algérie a mis en œuvre un programme national d'efficacité énergétique à l'horizon 2030. Ce programme vise globalement la réduction de la consommation de 9 % à travers l'introduction des équipements et des technologies performantes dans l'ensemble des secteurs. Le secteur du bâtiment a été classé le plus énergivore avec une consommation qui représente environ de 47 % de la consommation finale. C'est donc dans la rénovation énergétique des bâtiments que réside un potentiel d'économie d'énergie. En Algérie, des modèles de construction étrangers, inappropriés au contexte climatique, se sont généralisés ce qui a conduit à la réalisation de passoires thermiques d'autant plus qu'aucune réglementation thermique n'est exigée lors de la conception. Ce travail a pour objectif l'étude de l'impact de quelques solutions de rénovation de bâtiments existants sur leur bilan énergétique et le confort de ses occupants. Tous les composants énergétiques sont analysés, y compris l'éclairage, l'isolation des parois, le vitrage utilisé, les protections solaires, etc, dans le but d'identifier des solutions permettant la réduction de la facture énergétique. Pour cela, les différentes approches pouvant être appliquées pour chaque composante entraînant une amélioration du fonctionnement du système sont présentées. Le travail est porté sur un logement-type largement répandu dans la construction algérienne sous deux climats différents, méditerranéen (Bejaia) et aride (Bechar). Deux modèles de simulation dynamique du bâtiment ont été développés dans le logiciel TrnSys. Un premier représentant le bâtiment tel qu'il est construit et, un second, pour le bâtiment après rénovation. Il a été trouvé que l'efficacité des mesures de rénovation sélectionnées varient en fonction des caractéristiques du climat. Les résultats de l'étude ont révélé que la combinaison de différentes mesures proposées dans cette étude permet de réduire les besoins énergétiques de 75 % et d'améliorer le confort de 42 % à Bejaia contre 63 % et 25 % respectivement à Bechar.

Modélisation spectrale des écoulements fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires

Léa Cherry^{1,*}, Gilles Flamant¹, Françoise Bataille¹

* ✉ : lea.cherry@promes.cnrs.fr

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (France)

Mots clés : Récepteur solaire, Ecoulement anisotherme, Modèle de turbulence, Couplage thermique, dynamique

Résumé :

Cette étude s'intéresse à la modélisation des écoulements turbulents fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires dans le cas où le fluide caloporteur est un gaz sous pression, comme schématisé dans l'image ci-jointe. L'objectif est d'identifier les mécanismes de transferts thermiques entre le récepteur solaire et le fluide caloporteur et d'étudier l'influence des forts gradients de température sur l'écoulement.

Plus précisément, nous utilisons des modèles de turbulence en deux points de type EDQNM (Eddy-Damped Quasi-Normal Markovianized). Ces modèles visent à donner des équations d'évolution pour les corrélations doubles en deux points, contrairement aux modèles en un point de type RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), qui modélisent les corrélations doubles en un point. L'avantage des modèles en deux points est qu'ils permettent de mettre en évidence les phénomènes de transfert d'énergie entre les différentes échelles de la turbulence et donc de rendre compte des mécanismes physiques de transferts thermiques. L'approche de la modélisation en deux points nous conduit à écrire les équations dans l'espace spectral grâce à la transformée de Fourier, ce qui permet de passer d'une variable de position x à une variable spectrale k , inversement proportionnelle à la longueur d'onde spectrale. Les modèles EDQNM ont largement été étudiés dans la littérature, tout d'abord dans le cas idéalisé des écoulements turbulents incompressibles, homogènes et isotropes [1]. Ce modèle a ensuite été étendu à des écoulements plus complexes, dont des écoulements anisotropes [2] ou des écoulements faiblement compressibles [3]. La température a néanmoins toujours été étudiée en tant que scalaire passif. Cependant, les écoulements à l'étude présentent un fort couplage entre thermique et dynamique, du fait des forts gradients de température mis en jeu [4]. Afin de développer des modèles EDQNM qui rendent compte de ces couplages, il a donc été nécessaire d'explicitier l'influence de l'anisothermie sur les caractéristiques de l'écoulement, et notamment la masse volumique, la viscosité, la conductivité thermique. Cela nous a amenés à formuler une série d'hypothèses sur les caractéristiques de l'écoulement. Nous proposons donc ici un modèle spectral pour les corrélations doubles de vitesse en deux points, les corrélations doubles de température en deux points, et les corrélations vitesse-température dans le cas des écoulements fortement anisothermes au sein des récepteurs solaires.

[1] Steven A. Orszag. "Analytical theories of turbulence". *Journal of Fluid Mechanics* 41.2 (1970), p. 363-386. issn : 0022-1120, 1469-7645. doi : 10.1017/S0022112070000642.

[2] Antoine Briard, Thomas Gomez et Claude Cambon. "Spectral modelling for passive scalar dynamics in homogeneous anisotropic turbulence." *Journal of Fluid Mechanics* 799 (2016), p. 159-199. doi : 10.1017/jfm.2016.362.

[3] Jean-Pierre Bertoglio, Françoise Bataille et Jean-Denis Marion. "Two-point closures for weakly compressible turbulence". *Physics of Fluids* 13.1 (jan. 2001), p. 290-310. issn : 1070-6631, 1089-7666. doi : 10.1063/1.1324005.

[4] Frederic Aulery et al. "Spectral analysis of turbulence in anisothermal channel flows". *Computers & Fluids* 151 (juin 2017), p. 115-131. issn : 00457930. doi : 10.1016/j.compfluid.2016.06.011.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-009>

Simulation Numérique de la Convection Double Diffusive dans un Demi-disque 2D avec température inhomogène sur la voûte

Riad Teggour^{1,*}, Kheiri Abdelhamid¹, Mohammed Khalij¹, Boris Arcen¹, Salaheddine Skali Lami¹

* ✉ : riad.teggour@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Convection double diffusive, Simulation numérique, Dynamique du climat intérieur

Résumé :

Le changement climatique est de plus en plus considéré comme une menace pour les sites de patrimoine culturel. Les grottes décorées situées dans les systèmes karstiques en font partie. Afin de mieux comprendre la dynamique du climat intérieur des grottes, il est aussi important de modéliser les écoulements d'air, plus ou moins humide, dans l'espace souvent confiné de ces grottes ainsi que les phénomènes de condensation de l'eau sur les surfaces. Ce travail présente une étude numérique de la convection double diffusive laminaire et stationnaire de l'air humide dans un demi-disque 2D. Avec comme conditions aux limites une température élevée et une concentration de masse importante à la base, suivies d'un profil décroissant linéaire avec la hauteur sur la voûte. L'étude est établie sur une plage de $10E4 \leq Ra \leq 2.1 \times 10E6$, et un $Pr = 0.71$. Les résultats révèlent une perte de symétrie de l'écoulement et des contours de température et de concentration à partir de $Ra \simeq 9 \times 10E4$. On observe une accentuation de la dissymétrie en fonction du Rayleigh jusqu'à $Ra \simeq 6 \times 10E5$, puis l'arrêt de sa progression. Les résultats démontrent par ailleurs les zones où les échanges de chaleur et de masse sont élevées, et celles où elles le sont moins. On observe aussi l'influence du Rayleigh sur ces derniers

Modélisation et simulation d'un cycle OTEC et étude d'un couplage avec un système de climatisation par eau de mer profonde (SWAC)

Perceval Raybaud¹, Kanhan Sanjivy^{1,*}, Franck Lucas¹, Olivier Marc²

* ✉ : kanhan.sanjivy@doctorant.upf.pf

¹ Université de la Polynésie Française (Polynésie française)

² Université de La Réunion - Faculté des Sciences et Technologies (La Réunion)

Mots clés : Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC), Système de climatisation par eau de mer profonde (SWAC), Couplage OTEC/SWAC

Résumé :

La technologie de conversion de l'énergie thermique des océans (Ocean Thermal Energy Conversion ou OTEC) utilise les eaux en surface et en profondeur des océans pour produire de l'électricité. Il s'agit d'un système thermodynamique utilisant un Cycle Organique de Rankine (ORC) ouvert ou fermé, fonctionnant respectivement soit avec de l'eau de mer, soit avec un autre fluide de travail. En raison de la faible différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes (environ 20-23 °C), le rendement thermodynamique idéal d'un tel cycle est assez faible, autour de 7 %. Pour explorer le potentiel de cette technologie, un prototype à terre OTEC, de 14 kWe, a été développé au laboratoire PIMENT à l'île de la Réunion afin de tester différents types d'échangeurs de chaleur. Cet article présente dans un premier temps la modélisation d'une centrale OTEC utilisant l'ammoniac comme fluide de travail. Les résultats de simulation de ce modèle sont ensuite comparés aux données expérimentales issues du prototype à terre du laboratoire PIMENT puis à d'autres résultats issus de la littérature scientifique pour valider le changement d'échelle. Les résultats obtenus par le modèle sur certaines variables comme les températures d'eau chaude et froide en sortie de cycle ou la puissance produite à la turbine sont proches de ceux attendus avec des écarts inférieurs à 0,15 °C pour les températures et inférieurs à 4 % pour les puissances. Le couplage en série d'un OTEC et d'un système de climatisation par eau de mer profonde (SWAC) est également étudié. Cette étude s'est basée sur le cas réel du SWAC de l'hôtel The Brando sur l'atoll de Tetiaroa en Polynésie Française. L'objectif est de voir si ce couplage OTEC/SWAC peut rendre l'ensemble de l'installation autonome en électricité. Les résultats montrent que l'OTEC permet de fournir 50 % de l'électricité nécessaire au SWAC avec la conduite d'eau de mer actuelle. En guise de perspectives, il a été vu qu'en augmentant le débit d'eau de mer, ce qui impliquerait un redimensionnement des conduites de puisage et de rejet, l'autonomie de l'installation est envisageable tout en gardant des températures d'eau froide en sortie assez basses pour être exploitables dans un système SWAC.

Apport des modèles réduits pour l'identification expérimentale de la diffusivité thermique des métaux liquides

Thomas Pierre^{1,*}, Frédéric Joly², Jad Houssein³, Mickael Courtois³, Olivier Quemener², Muriel Carin³

* ✉ : thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Institut de Recherche Dupuy de Lôme (France)

² Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry (France)

³ Institut de Recherche Dupuy de Lôme (France)

Mots clés : Modèles réduits, Diffusivité thermique, Métaux liquides, Processus numérique inverse

Résumé :

La détermination de la diffusivité thermique des métaux liquides est un grand défi scientifique et technologique. L'identification de cette propriété s'effectue à partir d'un dispositif expérimental adapté aux hautes températures [1], associé à un processus numérique inverse. Ce dernier fait appel de façon itérative à un modèle numérique qui décrit les phénomènes thermiques instationnaires de conduction et d'advection au sein du métal en fusion. La résolution de tels modèles, classiquement de type éléments finis, nécessite un temps de calcul non négligeable qui peut s'avérer handicapant, voire rédhibitoire. Afin de surmonter ce problème, une technique de réduction modale est proposée ici, dans laquelle deux types de formulation modale sont développés : d'une part la POD (Proper Orthogonal Decomposition) permet la réduction du champ de vitesse, alors que la méthode AROMM (Amalgam Reduced Order Modal Model) est utilisée pour la température. L'utilisation conjointe de ces deux techniques permet une réduction importante de l'ordre du modèle numérique utilisé dans la procédure inverse, et donc du temps de calcul d'identification par rapport aux modèles classiques éléments finis. Ce papier décrit la procédure de réduction développée spécifiquement pour ce problème, et présente les premiers résultats qui montrent l'apport de la technique, en termes de précision des résultats et de rapidité de calcul.

[1] Houssein Jad, et al., A novel apparatus dedicated to the thermal diffusivity estimation of metals at high temperature, International Journal of Thermal Science 191 (2023) 108359.

Implémentation de résistances de contact en 2-D dans un circuit équivalent. Thermique d'une encoche statorique d'un moteur électrique

Philippe Nguyen¹, Philippe Baucour^{1,*}, Frédéric Dubas¹, Philippe Desevaux¹, Christophe Corneloup², Rémi Falcand²

* ✉ : philippe.baucour@femto-st.fr

¹ Franche-Comté Electronique Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies (UMR 6174)

² Baker Hughes Thermodyn (France)

Mots clés : Moteur électrique, Modélisation numérique, Circuit équivalent thermique, Résistances de contact

Résumé :

Les moteurs électriques à grande vitesse présentent une densité de puissance massique très élevée, avec des contraintes thermiques sévères. De plus, les conditions d'alimentation du moteur électrique par le convertisseur de puissance ainsi que sa commande influent considérablement sur les pertes Joule dans le bobinage, les pertes fer et les pertes dans les aimants permanents. L'analyse du comportement thermique d'un moteur, permettant l'évaluation des températures maximales atteintes par les matériaux, s'avère cruciale pour garantir ses performances et sa fiabilité. Le comportement thermique du moteur électrique peut être évalué à l'aide de méthodes numériques de type CFD (Computational Fluid Dynamics). Ces modèles, bien que puissants, présentent une complexité dans leur implémentation, nécessitent des ressources de calcul importantes, et sont généralement restreints aux phases de développement préliminaires. Cette étude présente le développement d'un circuit équivalent thermique en 2D et son application à une encoche statorique de moteur électrique. Le modèle permet de créer une géométrie en décomposant cette dernière en plusieurs régions. Les matériaux qui les composent sont considérés comme anisotropes et indépendants de la température, tandis que les sources de chaleur sont constantes et uniformes. Les transferts radiatifs sont négligés. Les conditions limites imposées aux frontières de l'ensemble peuvent être de différents types, telles qu'une température imposée, une convection avec un coefficient d'échange h et une température ambiante, ou une densité de flux. L'apport de ce modèle réside dans l'intégration des résistances de contact thermiques bidimensionnelles (r , $heta$) qui peuvent être utilisées pour simuler un élément de faible épaisseur, permettant ainsi de réduire le maillage et donc le temps de calculs. Ces résistances peuvent également être utilisées pour introduire des lames d'air sur des surfaces de contact entre différentes régions, afin de se rapprocher de conditions expérimentales remettant en question l'hypothèse du contact parfait. L'un des cas présentés dans l'article concernera la simulation d'une fine couche isolante autour de la bobine par le biais de l'analogie des résistances de contact. Les résultats obtenus seront comparés à ceux issus d'une modélisation CFD en 3D simulant réellement cette couche isolante.

Résolution des transferts de chaleur par Monte Carlo dans une géométrie urbaine lors d'une vague de chaleur

Cyril Caliot^{1,*}, Louis D'alençon², Stéphane Blanco³, Vincent Forest⁴, Richard Fournier³, Frédéric Hourdin², Florent Retailleau¹, Robert Schoetter⁵, Najda Villefranque⁵

* ✉ : cyril.caliot@cnrs.fr

¹ LMAP UPPA CNRS (France)

² Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539)

³ Groupe de Recherche Energétique, Plasmas et Hors Equilibre (France)

⁴ Méso-Star (France)

⁵ Centre national de recherches météorologiques (France)

Mots clés : méthode de Monte Carlo, géométrie urbaine

Résumé :

La modélisation des transferts de chaleur dans une géométrie urbaine constitue une étape clé pour prévoir le confort extérieur des piétons et la consommation énergétique des bâtiments ainsi que pour quantifier l'effet des mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Une difficulté réside dans le passage à l'échelle de ces simulations qui doivent intégrer la morphologie urbaine complexe constituée de divers matériaux.

Pour répondre à cet enjeu, une approche probabiliste de la résolution des transferts de chaleur est présentée qui utilise la méthode de Monte-Carlo connue pour son insensibilité aux géométries et conditions aux limites complexes.

La formulation intégrale est présentée avec les marches aléatoires pour la conduction et les rayonnements thermique et solaire.

Le modèle probabiliste de transfert de chaleur est appliqué à un scénario de vague de chaleur où sont calculées : la température radiante moyenne extérieure montrant l'influence des arbres ; et la température moyenne intérieure des murs montrant l'influence des apports solaires à travers les ouvertures.

Modélisation des transferts radiatifs avec fluorescence pour la quantification de biomarqueurs en neurochirurgie

Elias Gabory^{1,2}, Arthur Gautheron², Mathieu Galtier¹, Bruno Montcel², Maxime Roger^{1,*}

* ✉ : maxime.roger@insa-lyon.fr

¹ Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (France)

² Centre de Recherche en Acquisition et Traitement de l'Image pour la Santé (France)

Mots clés : Transferts radiatifs, Biomarqueur, Méthode Monte Carlo

Résumé :

Un modèle de propagation du rayonnement avec fluorescence pour la quantification de biomarqueurs en neurochirurgie est proposé dans cette étude et simulé avec la méthode de Monte-Carlo. Ce modèle s'appuie sur l'équation de transfert radiatif dans laquelle est ajouté un terme source tenant compte de l'émission par fluorescence, et qui va impliquer un couplage entre les équations définies à la longueur d'onde d'absorption par le fluorophore, et aux longueurs d'onde d'émission fluorescente. Des mesures de spectroscopie de fluorescence sur fantômes optiques ont permis de valider expérimentalement l'approche proposée.

Mise en place d'une méthodologie de construction de benchmarks pour la validation des modèles de microclimat urbain

Teddy Gresse¹, Lucie Merlier¹, Auline Rodler^{2,3,*}, Julie Soriano¹, Felix Schmitt¹, Mathieu Galtier¹, Frédéric André¹, Frédéric Kuznik¹, Jérôme Jacob⁴, Lionel Soulhac⁵, Jean-Claude Krapez⁶, Jean Pierre⁶, Laure Roupioz⁷, Xavier Briottet⁷, Françoise Nerry⁸, Marjorie Musy^{2,3}

* ✉ : auline.rodler@cerema.fr

¹ Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (France)

² Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement - (France)

³ LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (France)

⁴ Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (France)

⁵ Laboratoire de Mecanique des Fluides et d'Acoustique (France)

⁶ DOTA, ONERA (France)

⁷ ONERA, Université de Toulouse (France)

⁸ Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (France)

Mots clés : Microclimat urbain, Modèle à l'échelle du quartier, Comparaison simulation mesures

Résumé :

La communauté des chercheurs en modélisation énergétique des bâtiments a proposé un cadre de validation complet, le BESTEST[1], mais aucune proposition de ce type n'a été faite pour la modélisation du microclimat urbain. Dans le cadre du projet ANR DIAMS, nous proposons une méthodologie pour engager une telle approche et une première mise à l'épreuve de la démarche suggérée. La méthode repose sur deux étapes. La première étape considère des cas académiques dans une configuration entièrement définie. Les propriétés optiques des surfaces et les sollicitations météorologiques sont connues. La seconde étape consiste à confronter les résultats des simulations microclimatiques avec des mesures et observations faites sur une scène urbaine réelle. Cette comparaison est effectuée sur la base d'un ensemble de données acquis lors de l'expérience CAMCATT-AI4GEO menée dans la ville de Toulouse en juin 2021. Cette campagne permet d'avoir une connaissance partielle des propriétés radiatives et thermiques des surfaces ainsi que les conditions atmosphériques à proximité du quartier. L'évolution des températures de surfaces (LST) sur différentes surfaces a été suivie grâce à plusieurs capteurs iButtons. La démarche a été mise en application avec 4 modèles de microclimat urbains : MATHIS, Solene+Sushi, Solene-Microclimat, Traboule+ProLB. L'application de la première étape montre des résultats globalement comparables malgré les différences de résolution et d'objectifs. Concernant la seconde étape, une comparaison entre les résultats des simulations et les températures de surface mesurées montre des valeurs d'erreur moyennes entre 2/3 °C pour les façades en comparant avec iButtons et 1°C pour les toits en utilisant le LST aéroporté. Ainsi, Traboule+ProLB, caractérisé par une haute résolution spatiale et temporelle, apparaît comme le modèle le plus détaillé et le plus précis pour prédire les aspects thermo-radiatifs et aérodynamiques. Cependant, il nécessite d'effectuer des calculs parallèles mettant en jeu des ressources de calcul conséquentes. Solene-Microclimat se distingue comme étant le modèle le plus complet, incorporant notamment des considérations sur l'évapotranspiration. Comme Solene-Sushi, il maintient une haute résolution spatiale tout en étant efficace en termes de calcul et adapté à une utilisation sur des ordinateurs personnels. MATHIS fait preuve d'une bonne précision dans la prévision des valeurs moyennes de surface, tout en nécessitant des ressources informatiques minimales. Cependant, sa résolution spatiale s'avère faible se limitant à l'échelle de la rue. [1] <https://www.aivc.org/resource/bestest-method-evaluating-and-diagnosing-building-energy-software>

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-027>

Etude de la convection naturelle transitoire d'un fluide à grande thermodépendance en viscosité en configuration cylindrique

Ayoub Badia¹, Arnaud Poulesquen¹, Paul Jourda², Charles Brissot^{1,*}

* ✉ : charles.brissot@cea.fr

¹ CEA-Marcoule (France)

² CEA- Saclay (France)

Mots clés : Méthode Monte Carlo, Enrobé bitumineux, Convection naturelle

Résumé :

La compréhension du comportement thermique d'un déchet d'enrobé bitumineux, constitué de sels radioactifs dans une matrice bitume, est primordiale d'un point de vue sûreté. Cette problématique nous mène à nous intéresser au comportement convectif transitoire en géométrie cylindrique des fluides à haute thermodépendance en viscosité. En effet celle du bitume évolue grandement avec la température, en perdant notamment six décades entre 0 et 100 °C. Le scénario investigué consiste en un fut initialement à température ambiante soumis à une sollicitation thermique externe en créneau de température. Une analyse d'ordre de grandeur a été mise en place pour comprendre les caractéristiques principales du système. Trois phases ont notamment été décrites : le choc thermique diffusif, la mise en place de la convection à l'échelle du fut, et le retour de la diffusion pour chauffer le cœur froid dans le fond du fut. Cette analyse a été appuyée par des simulations numériques réalisées en 2D axisymétrique via l'outil Comsol, et en 3D via un outil développé par le Cemef, un laboratoire partenaire. Le modèle employé s'appuie sur l'approximation de Boussinesq et sur une loi exponentielle de dépendance de la viscosité en température. 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 1E3 à 1E6) et d'en tirer une corrélation sur le temps caractéristique de réchauffement du système et sur le flux maximal atteint. Pour finir, l'influence de la présence d'une contrainte seuil sur l'écoulement a été investiguée. Celle-ci est représentative des effets non newtoniens observés dans les enrobés, et peut bloquer partiellement ou totalement les écoulements convectifs.

Etude expérimentale de l'effet de la rugosité sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide

Antoine Avrit^{1,2}, Asma Djermoune^{1,2,*}, Alexandre Lecoanet², Nathalie Seiler², Michel Gradeck¹, Nicolas Rimbert¹

* ✉ : asma.djermoune@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

² CEA, DES, IRESNE, DTN, SMTA (France)

Mots clés : Ablation, Rugosité, Surface solide, Jet liquide

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mitigation des accidents nucléaires graves dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Afin de limiter les conséquences dues à la création de corium (un mélange radioactif de combustible nucléaire fondu et de matériaux de la structure du réacteur) lors de la fusion du cœur, deux dispositifs peuvent être implémentés au sein des nouveaux RNR-Na. Ces dispositifs sont des "tubes de déchargement", conçus pour transférer le corium vers la partie inférieure de la cuve, et un "récupérateur de corium", destiné à recevoir ce corium afin d'éviter une recriticité et pour traiter son refroidissement sur le long terme. Cependant, le corium atteint le récupérateur sous forme de jet chaud (3000k) ce qui peut induire un risque d'ablation locale et de percement du récupérateur. Il est nécessaire de prendre ce risque en compte pour pouvoir assurer l'intégrité du récupérateur de corium pendant cette phase de relocalisation, pour éviter tout risque de perforation. Dans ce contexte, la présente étude se concentre sur l'ablation thermique du récupérateur par le biais de l'étude de l'impact d'un jet chaud sur une surface solide rugueuse.

Parmi les phénomènes souvent ignorés par les études portant sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide nous avons choisi d'investiguer l'effet de la rugosité sur l'ablation. Ainsi, ce travail présente les travaux expérimentaux menés pour étudier l'ablation d'un bloc de glace par un jet d'eau sur une surface rugueuse, dans des conditions déterminées pour être représentatives d'un cas réacteur. Il a été observé que la rugosité de la surface exerce une influence notable, augmentant considérablement la vitesse d'ablation du solide.

Modèle zonal d'un échangeur avec changement de phase : formulation big M pour l'optimisation

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

* ✉ : alix.untrau@univ-pau.fr

¹ LaTEP (France)

Mots clés : Echangeur avec changement de phase, Modèle zonal, Optimisation

Résumé :

Les échangeurs de chaleur co-axiaux à contre-courant sont fréquemment utilisés dans les systèmes thermiques. L'échange de chaleur est amélioré lorsqu'un changement de phase se produit, les évaporateurs et condenseurs font donc l'objet d'un intérêt accru. Cependant, la modélisation précise et rapide de tels échangeurs, permettant de déterminer les températures de sortie de chaque courant ainsi que l'énergie échangée, reste un défi. En particulier, les modèles traditionnellement utilisés tels que les volumes finis ou le Moving Boundary Model (MBM) requièrent des structures conditionnelles pour évaluer l'existence des différentes zones d'échange, entre les deux courants présents sous différentes phases, ce qui limite leur intégration à des problèmes d'optimisation plus larges. Dans ce travail, un modèle zonal est utilisé pour simuler le comportement d'un échangeur de chaleur en régime permanent avec potentiel changement de phase des deux fluides selon l'énergie échangée, sur le logiciel d'optimisation GAMS. Le modèle est formulé comme un problème d'optimisation non linéaire en variable mixtes (MINLP), dont les variables binaires qualifient l'existence d'une zone d'échange entre fluides à différents états (liquide, liquide/vapeur ou vapeur). Des corrélations empiriques sont utilisées pour le calcul des coefficients de transfert pour chaque phase. Le modèle est testé sur plusieurs cas d'étude considérant uniquement des corps purs. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus avec l'approche MBM par Bell et al., 2015, et un bon accord est constaté. Le nouveau modèle développé pourrait ainsi être intégré à des études d'optimisation plus larges, telles que l'optimisation structurelle d'un réseau d'échangeurs. Cette approche pourrait ensuite être étendue aux mélanges dans l'évaporateur et le condenseur. Référence : Ian H. Bell et al. "A generalized moving-boundary algorithm to predict the heat transfer rate of counterflow heat exchangers for any phase configuration". In : Applied thermal Engineering 2.1 (2015), pp. 192–201.

Impact du cisaillement liquide-vapeur sur un écoulement diphasique à film tombant dans un échangeur de chaleur à plaques d'une machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$

Jana Sleiman^{1,2}, Romain Collignon¹, Benoit Stutz^{2,*}, Hai Trieu Phan¹

* ✉ : benoit.stutz@univ-smb.fr

¹ CEA-LITEN (France)

² LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (France)

Mots clés : Machine à absorption, Ecoulement diphasique, Echangeurs de chaleur à plaques, Interaction hydrodynamique

Résumé :

Ces dernières années, la demande croissante de refroidissement, principalement due à l'augmentation des températures estivales, a été un défi majeur, comme le souligne l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Les climatiseurs traditionnels à compression mécanique ont été la solution privilégiée pour répondre à cette demande, au prix d'une consommation d'électricité élevée. En réponse, les machines à absorption se sont positionnées comme une solution alternative, utilisant des sources de chaleur durables telles que l'énergie solaire ou la chaleur fatale industrielle. Cette étude s'inscrit dans le cadre du développement de machines à absorption compactes qui intègrent des échangeurs de chaleur à plaques. Un premier modèle a été développé permettant de décrire les transferts de masse et de chaleur en présence d'échangeurs à plaques et films ruisselant implantés dans les machines à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, lorsque les interactions hydrodynamiques entre les films et l'écoulement vapeur peuvent être considérées comme négligeables. Nous proposons, dans le cadre de cette étude, d'intégrer les interactions hydrodynamiques dans le modèle pour le dimensionnement d'échangeurs compacts. Un nouveau modèle analytique a été développé à cette fin. Ce modèle permet de prendre en compte l'impact du cisaillement et des perturbations interfaciales dans le calcul de l'épaisseur de film moyen. Il permet également d'estimer les conditions d'apparition de l'engorgement. Ce modèle analytique a été intégré au modèle de transfert de chaleur et de masse précédemment développé et appliqué à deux composants de la machine : le désorbeur et l'absorbeur. Les résultats de l'étude démontrent que l'augmentation de la compacité a peu d'effet sur les coefficients de transfert. Les conditions d'apparition de l'engorgement prédites par le modèle sont comparées à différentes corrélations de la littérature.

Emissivité hémisphérique d'une cavité isotherme cylindrique ou rectangulaire

Adrien Barthélémy^{1,*}, Thomas Villemin¹, Vincent Schick¹, Benjamin Remy¹, Laura Deflandre², Elodie Moebel²

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

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

² Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy (France)

Mots clés : Emissivité, Cavité isotherme, Modèles numériques, Modèles réduits

Résumé :

Le procédé industriel étudié est la chauffe par rayonnement dans un four sous vide d'une charge en aluminium présentant deux types de surface : de l'aluminium plein dont les propriétés optiques de surface sont connues, et des cavités rectangulaires de dimensions variables dont les propriétés optiques apparentes sont inconnues. Pour parfaire son jumeau numérique du système four + charge, l'industriel souhaite connaître l'émissivité apparente de ce second type de surface pour modéliser au mieux les transferts radiatifs. L'objectif de l'étude est donc de proposer un modèle réduit de l'émissivité apparente d'une cavité isotherme en fonction de ses dimensions et de l'émissivité du matériau supposé opaque et gris, pour une réflexion diffuse ou spéculaire. Dans un premier temps, une recherche bibliographique montre que la modélisation de la cavité rectangulaire n'est pas développée. Cependant, le cas de la cavité cylindrique est largement traité de manière analytique, avec notamment l'article de Sparrow, Albers et Eckert de 1962 [1] en réflexion diffuse et celui de l'article de Lin et Sparrow de 1965 [2] en réflexion spéculaire. Ces modèles analytiques sont toutefois complexes (intégrales couplées à résoudre de manière itérative). Dans un deuxième temps, deux modèles numériques de la cavité cylindrique ou rectangulaire sont élaborés, le premier se basant sur la méthode de Monte Carlo (lancer de rayons) et le second sur le logiciel Modray. Ils permettent le calcul de l'émissivité apparente de la cavité pour une réflexion diffuse comme spéculaire du matériau. Les deux modélisations aboutissent aux mêmes résultats. De plus, ils sont en accord avec les modèles analytiques de la littérature dans le cas cylindrique, ce qui conforte leur utilisation pour le cas rectangulaire. Dans un troisième temps, des modèles réduits donnant l'émissivité apparente de la cavité cylindrique ou rectangulaire (pour une réflexion diffuse ou spéculaire du matériau) sont identifiés, avec pour variables l'émissivité du matériau et les dimensions de la cavité. Ces modèles réduits sont adaptés à des calculs précis et rapides d'ingénierie. En outre, des mesures expérimentales d'émissivité apparente par thermographie infrarouge sont réalisées pour évaluer la validité des modèles réduits de la cavité rectangulaire.

[1] SPARROW Ephraim M., ALBERS Lynn U., ECKERT Ernst Rudolf Georg, Thermal Radiation Characteristics of Cylindrical Enclosures (1962), Journal of Heat Transfer, 84, 1 (pp. 73-79), DOI : 10.1115/1.3684295

[2] LIN S. H., SPARROW Ephraim M., Radiant Interchange Among Curved Specularly Reflecting Surfaces - Application to Cylindrical and Conical Cavities (1965), Journal of Heat Transfer, 87, 2 (pp. 299-307), DOI : 10.1115/1.3689093

Dimensionnement de fissures non débouchantes dans des pièces métalliques par thermographie laser

Stanislas Lech^{1,2,*}, Ludovic Gaverina¹, Patrick Bouteille², Jean-Michel Roche¹, Yannick Lemaoult³

* ✉ : stanislas.lech@onera.fr

¹ ONERA (France)

² CEntre Technique des Industries Mécaniques (France)

³ IMT Ecole nationale supérieure des Mines d'Albi-Carmaux (France)

Mots clés : thermographie laser, modélisation thermique, nombre de Péclet, fissure non débouchante

Résumé :

La détection précoce des fissures demeure cruciale pour garantir la sécurité des composants métalliques. La thermographie laser, en particulier la méthode dite "Flying spot", représente une technique de Contrôle Non Destructif (CND) sans contact, basée sur le balayage d'un faisceau laser le long d'une surface, permettant la détection de fissures débouchantes. La détectabilité des fissures dépend alors des paramètres régissant le banc d'essai, tels que la vitesse de balayage du laser, sa puissance, et la fréquence d'enregistrement de la caméra infrarouge. L'objectif de cette étude était d'évaluer la capacité de la technique de thermographie laser à détecter des fissures non débouchantes, c'est-à-dire non visibles en surface, dans des pièces métalliques, et à estimer leurs profondeurs et inclinaisons. De plus, dans une perspective de réduction des durées de maintenance, l'étude visait à se limiter à un balayage laser simple, parallèle à la fissure, contrairement à l'approche conventionnelle qui préconise un balayage aller-retour traversant [1] [2]. Dans un premier temps, le travail a consisté en une étude numérique de sensibilité visant à optimiser les paramètres dimensionnants d'un essai "Flying spot", avec pour objectif d'augmenter les signatures thermiques des fissures. A cette fin, un modèle par éléments finis a été mis en œuvre à l'aide du logiciel multiphysique COMSOL. La stratégie proposée a débuté par la simulation d'une fissure débouchante [2] avec un balayage traversant. L'objectif était d'optimiser les paramètres du banc d'essai, tels que la vitesse de balayage et le rayon du laser, pour obtenir un nombre de Péclet proche de 1, conformément aux recommandations de Krapez [1]. Dans un second temps, le cas plus complexe des fissures non débouchantes a été abordé, l'optimisation de l'orientation du balayage laser par rapport à l'inclinaison de la fissure devenant alors impossible. L'échantillon ciblé est un acier inoxydable avec des fissures de dimensions millimétriques, d'ouverture allant de 1 mm à 200 μm , avec un angle d'inclinaison variable compris entre 0° et 45° par rapport à la normale de la surface de la pièce, et de profondeur oscillante entre 10 μm et 100 μm . Les paramètres Flying Spot qui font l'objet de l'étude de sensibilité sont les suivants : la puissance du laser, pouvant varier de 0,5 à 3 W, le rayon du spot laser, allant de 250 μm à 2 mm, la vitesse de balayage, comprise entre 0,5 et 10 mm/s, et l'orientation du faisceau laser, d'une incidence normale à une incidence parallèle [3]. La seconde étape du travail a consisté à mener une campagne d'essais sur le banc de l'ONERA, sur la base de paramètres dont le choix a été optimisé par simulation numérique. La campagne d'essais sur le banc et l'étude pour des fissures non débouchantes est en cours. [1] Krapez, J.-C. : Résolution spatiale de la caméra thermique à source volante. *Int. J. Therm. Sci.* 38, 769–779 (1999) Available at : <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.1998.048> [2] Salazar, A., Mendioroz, A. and Oleaga, A. (2020) 'Flying spot thermography : Quantitative assessment of thermal diffusivity and crack width', *Journal of Applied Physics*, 127(13), p. 131101. [3] Helvig, K. et al. (2023) 'Automated crack detection on metallic materials with flying-spot thermography using deep learning and progressive training', *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Available at : <https://doi.org/10.1080/17686733.2023.2266176>.

Etude expérimentale et numérique des déformations pariétales sur l'intensification des transferts de chaleur et du mélange dans un écoulement interne tubulaire

Pascale Bouvier^{1,*}, Ferial Yahiat², Serge Russeil², Christophe Andre¹, Daniel Bougeard²

* ✉ : pascale.bouvier@junia.com

¹ JUNIA-HEI (France)

² Centre for Energy and Environment (France)

Mots clés : Ecoulement interne tubulaire, Déformations pariétales, Géométrie tubulaire déformée

Résumé :

Ce travail porte sur l'intensification des transferts massiques et thermiques au sein d'un écoulement interne dans des géométries tubulaires dont les parois sont macro-déformées. Deux configurations géométriques sont étudiées : (i) la géométrie « DT » (Deformed Tube) où la paroi du tube est sinusoïdalement déformée et (ii) la géométrie « DETSC » (Deformed External Tube and Swirled Core) où un noyau central générant un mouvement de « swirl » est inséré. L'étude est menée par voie numérique et expérimentale pour un régime d'écoulement laminaire. L'objectif est d'évaluer l'influence du pas du noyau interne sur la qualité du mélange et les transferts thermiques. L'analyse est menée selon deux axes : (i) l'aspect expérimental au niveau global par la détermination de la Distribution des Temps de Séjours et des pertes de charges et (ii) l'aspect local, purement numérique, faisant appel à différents outils numériques de la mécanique des fluides. Les profils de vitesses et le taux de mélange permettent de caractériser finement les écoulements secondaires générés. Les propriétés du comportement chaotique sont analysées sous forme de section de Poincaré. Les résultats montrent l'apparition de phénomènes d'advection chaotiques dans les deux configurations étudiées mais pour des nombres de Reynolds plus bas dans la configuration DETSC. L'analyse des propriétés de l'écoulement permet d'expliquer l'allure des performances thermo-hydrauliques et les phénomènes d'intensification en fonction du pas du « swirl ».

Démonstration de faisabilité : apprentissage faiblement supervisé pour la reconstruction a priori de SGE-T utilisant des corrélations en deux points

Yanis Zatout^{1,*}, Adrien Toutant¹, Onofrio Semeraro², Lionel Mathelin², Françoise Bataille¹

* ✉ : yanis.zatout@promes.cnrs.fr

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (France)

² Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique (France)

Mots clés : Apprentissage machine, Simulations à grande échelle thermique, Réseaux de neurones convolutifs

Résumé :

Le développement des centrales solaires de nouvelle génération nécessite des récepteurs solaires qui fonctionnent à haute température. Le fluide caloporteur est un mélange de gaz sous pression. Dans cette configuration, la maîtrise des écoulements turbulents fortement anisothermes, présents au sein des récepteurs, constitue un verrou scientifique au développement de ces nouvelles centrales d'autant que le couplage entre dynamique et thermique rend la physique complexe. Cet article traite de l'application de l'apprentissage machine (AM) pour la reconstruction ou la super-résolution des simulations à grande échelle thermique (SGE-T) dans le contexte d'un chauffage asymétrique, où le récepteur solaire est exposé à une seule face de lumière solaire concentrée. Les méthodes existantes de reconstruction de champs sous-résolus présentent une faible précision, notamment en ce qui concerne les statistiques au-delà du premier ordre. Nous proposons d'entraîner un réseau de neurones convolutif à déterminer la correction nécessaire à la reconstruction du champ de thermique SGE-T. Cette technique utilise les corrélations en deux points comme fonction de coût pour l'optimisation du réseau de neurones. En effet, cette quantité statistique nous permet de comparer différentes simulations et donc d'effectuer un apprentissage sur des données a posteriori, nous donnant ainsi les petites échelles reconstruites. Nous testerons également les performances du réseau de neurones appris sur des données SGE-T effectuée avec une condition aux bords de paroi oscillante comme test de robustesse face au changement de configuration d'écoulement. A notre connaissance, il n'existe pas de modèles de reconstruction utilisant des corrélations en deux points comme estimateur d'erreur. Nous proposons d'adapter les estimateur d'erreur déterminés lors de l'entraînement d'un réseau de neurones pour optimiser et améliorer la précision des champs reconstruits. Nous testons également dans cette étude différentes distances entre corrélations lors de l'apprentissage. A partir d'une base de données issue d'une SGE-T correspondant à un modèle de fermeture, nous serons capables d'apprendre une reconstruction qui respecte les statistiques de l'écoulement issu d'une simulation numérique directe dans les mêmes conditions physiques. La reconstruction apprise sera ensuite comparée a deux méthodes de reconstruction, pour avoir une référence. La première consiste en l'inversion du filtre SGE-T par son développement limité, la deuxième consiste en l'apprentissage d'un réseau de neurones de même architecture, avec une estimation d'erreur faite point à point. La technique de reconstruction présentée sera enfin testée sur une configuration d'écoulement à paroi oscillante pour évaluer la capacité du réseau à généraliser une reconstruction à des configurations différentes.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-051>

Etude par LES avec TrioCFD des modifications des structures turbulentes thermiques induites par les variations des propriétés thermophysiques de l'eau

Elie Roumet^{1,2,*}, Raksmy Nop¹, Nicolas Dorville¹, Marie-Christine Duluc²

* ✉ : elie.roumet@cea.fr

¹ CEA- Saclay (France)

² Laboratoire du froid et des systèmes énergétiques et thermiques (France)

Mots clés : TrioCFD, Structures turbulentes thermiques, Simulation numérique

Résumé :

L'étude de l'accident de type BORAX est cruciale pour la sûreté des réacteurs nucléaires expérimentaux de type piscine. Cet accident est caractérisé par une insertion brutale de réactivité engendrant une excursion exponentielle de puissance avec un temps caractéristique de l'ordre de la dizaine de millisecondes. Cette communication présente l'étude des échanges thermiques turbulents durant la phase monophasique d'un tel transitoire par simulation numérique avec une approche LES utilisant le code TRUST/TrioCFD développé au Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA). Nous examinerons spécifiquement l'influence de la variation des propriétés thermophysiques avec la température sur les mécanismes de transfert thermique.

Etude de la conductivité thermique des nanofils modulés de Silicium par la méthode de Monte Carlo combinée au formalisme de Green-Kubo

Isibert Nkenfack^{1,*}, Gilles Pernot¹, David Lacroix¹

* ✉ : isibert-marcel.nkenfack@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Méthode Monte Carlo, Green Kubo, Nanofil, Conductivité thermique

Résumé :

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation du transport des phonons dans des nanostructures et à la détermination de leurs propriétés thermiques. La technique utilisée est basée sur la résolution de l'équation de transport de Boltzmann par la méthode Monte Carlo, combinée au calcul de l'autocorrélation du flux de chaleur par la méthode de Green-Kubo. Cette méthode est utilisée pour déterminer la conductivité thermique des nanofils de silicium, présentant des géométries simples et complexes. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité de recherches antérieures [1], qui abordent de manière similaire la question du transport de phonons dans les matériaux nanoporeux. Nos résultats de simulations sont comparés aux données expérimentales présentes dans la littérature [2-5]. Pour tous les cas considérés, une concordance satisfaisante est notée entre les résultats de simulations numériques et les mesures expérimentales, avec des écarts relatifs se situant autour de 10 % ou en dessous. L'interprétation des résultats permet de souligner l'importance de la diffusion aux frontières des phonons, ainsi que l'impact de la nanostructuration, sur le transfert thermique des nanofils modulés avec et sans constriction. [1] D. Lacroix, M. I. Nkenfack, G. Pernot, and M. Isaiev. Thermal properties of nanoporous materials, large scale modelling with the use of Monte Carlo phonon transport autocorrelation. *Journal of Applied Physics*, 134(2) :025101, 07 2023. [2] Deyu Li, Yiyang Wu, Philip Kim, Li Shi, Peidong Yang, and Arun Majumdar. Thermal conductivity of individual silicon nanowires. *Applied Physics Letters*, 83(14) :2934–2936, 09 2003. [3] Jaeho Lee, Woochul Lee, Jongwoo Lim, Yi Yu, Qiao Kong, Jeffrey Urban, and Peidong Yang. Thermal transport in silicon nanowires at high temperature up to 700 K. *Nano letters*, 16, 05 2016. [4] Jeremie Maire, Roman Anufriev, Takuma Hori, Junichiro Shiomi, Sebastian Volz, and Masahiro Nomura. Thermal conductivity reduction in silicon fishbone nanowires. *Scientific Reports*, 8 :4452,03 2018. [5] Roman Anufriev, Sergei Gluchko, Sebastian Volz, and Masahiro Nomura. Quasi-ballistic heat conduction due to Lévy phonon flights in silicon nanowires. *ACS Nano*, 12, 11 2018.

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

Jeremy Bompas^{1,*}, Ward De Paepe¹

* ✉ : jeremy.bompas@umons.ac.be

¹ Université de Mons (Belgique)

Mots clés : Turbine à gaz, Performances de combustion, Comportement combustible

Résumé :

Les crises énergétiques successives mettent en lumière notre dépendance aux ressources fossiles. Pour autant, la demande en électricité et en chaleur ne cesse de croître tandis que les ressources fossiles s'épuisent par définition. Leurs perspectives de disponibilité à long terme, aggravée par les conflits majeurs internationaux engendrent de l'incertitude et des tensions sur le seul marché énergétique. Parallèlement, nous avons l'ambition de respecter l'Accord de Paris et réduire drastiquement nos émissions de gaz à effet de serre afin d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. De plus, au-delà des engagements climatiques liés aux gaz à effet de serre, les normes en matière d'émissions polluantes se renforcent dans les politiques sanitaires globales. Les ressources renouvelables produites à base de déchets organiques que sont les syngaz sont de bons candidats à la poursuite des objectifs de diversification et de flexibilité énergétique, particulièrement dans un contexte de production décentralisée telle que l'utilisation de micro turbines à gaz dans une application de cogénération de faible puissance. 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.

Modélisation analytique des transferts thermiques en régime permanent dans les parois ventilées à double peau grâce à la méthode des quadripôles.

Safaa Lahayrech^{1,2,*}, Anas El Maakoul¹, Alain Degiovanni¹, Ismail Khay³, Monica Siroux¹

* ✉ : safaa.lahayrech@insa-strasbourg.fr

¹ Laboratoire LERMA, Université Internationale de Rabat (Maroc)

² Laboratoire ICube, Université de Strasbourg (France)

³ Laboratoire LEMTA (France)

Mots clés : parois ventilée, modèle quadripolaire

Résumé :

Le secteur du bâtiment, tant résidentiel que tertiaire, reste l'un des secteurs les plus énergivores au monde malgré tous les efforts déployés par de multiples pays pour mettre en place des mesures d'obligations d'économie d'énergie. Plusieurs conceptions architecturales, passives et actives, sont étudiées dans la littérature pour accroître l'efficacité énergétique des bâtiments en améliorant les performances hygrothermiques de leurs enveloppes extérieures, à savoir les parois ventilées à double peau. Le travail présenté dans cet article propose un modèle analytique basé sur l'utilisation de la méthode des quadripôles et l'analogie thermique-électrique dans le but de simuler rapidement la performance thermique et énergétique de ce type de parois. Le modèle prend en compte les propriétés thermo-physiques des matériaux de construction, les paramètres géométriques de la façade à savoir celles de la lame d'air, et les conditions climatiques à simuler, et est facilement adaptable à des configurations de parois ventilées plus complexes. Les équations du modèle quadripolaire proposé sont résolues en régime transitoire et une fonction de transfert liant la température de l'air à l'entrée du mur extérieur et à la sortie de la lame d'air est retrouvée grâce à une transformée inverse de Laplace. Le modèle a enfin été validé numériquement sur ANSYS Fluent. Les résultats numériques et analytiques sont compatibles (moins de 3 % d'écart moyen), avec un temps de calcul analytique réduit (moins de 3 secondes pour les configurations VDF complexes et moins de 1 seconde pour les conceptions de murs simples et moins complexes, contre 6 heures pour les calculs CFD).

Enhancing the Thermal Performance of Electric Cable-heated Pavement by Asymmetrical Thermal Insulation Coating : A Numerical Simulation Study

Wang Renzhi¹, Fujiao Tang², Hossein Nowamooz^{1,*}

* ✉ : hossein.nowamooz@insa-strasbourg.fr

¹ INSA Strasbourg, ICUBE Laboratory, University of Strasbourg, Strasbourg, France (France)

² School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, China (Chine)

Mots clés : Electric cable, heated pavement, Thermal insulation coating, Numerical simulation

Résumé :

Recently, there has been a growing emphasis on incorporating energy systems into infrastructures. Among these systems, electrically cable-heated pavements stand out for their ability to melt snow and ice in cold regions during winter. Thermal Insulation Coating (TIC) is a technology employing thermally insulating materials as a spray to coat surfaces. These materials include suspension plasma spraying, silica aerogel, and nanostructured materials. Given that the heat from electrically cable-heated pavements is primarily directed upwards, employing an asymmetrical configuration of TIC in these systems could be advantageous. In this investigation, TIC would function effectively as a thermal barrier, blocking the thermal flux toward deeper and optimizing the whole system's thermal performance. Initially, a numerical model of an uncoated cable-heated pavement system was developed. This model was extended to include an asymmetrical TIC and subsequently its thermal interaction with the pavement structure. The incorporation of asymmetrical TIC has the potential to significantly enhance the energy performance of cable-heated systems. In a comparative analysis of uncoated cable-heated pavements, it was observed that cable-heated pavements had a higher surface temperature under identical conditions. Furthermore, the asymmetrically applying TIC could lead the heat transfer asymmetrically around heated-cable, which enriches the scientific understanding of asymmetrically applying TIC in cable-heated systems embedded in pavements.

Génération procédurale de géométrie urbaine pour la thermique

Cyril Caliot^{1,*}, Christophe Coustet¹, Vincent Eymet¹, Robert Schoetter¹, Benjamin Piaud¹

* ✉ : cyril.caliot@cnrs.fr

¹ LMAP UPPA CNRS (France)

Mots clés : Géométrie urbaine, Modélisation thermique probabiliste, Génération procédurale des bâtiments

Résumé :

L'analyse des transferts thermiques couplés en milieu urbain nécessite de prendre en compte la morphologie de la ville ainsi que la variété des propriétés physiques des matériaux qui la composent. Néanmoins, les simulations de quartier basées sur des méthodes déterministes atteignent des limites de faisabilité en raison de la taille du maillage. Récemment, une nouvelle approche probabiliste de modélisation thermique a été proposée. Elle consiste à résoudre la conduction couplée aux rayonnements (et à la convection) par une méthode de suivi de chemin (Monte-Carlo) dans une géométrie dont le volume n'a pas besoin d'être maillé. Cette caractéristique offre la possibilité d'étudier les transferts de chaleur dans des géométries de grande taille qui peuvent inclure des détails précis. Afin d'appliquer le modèle thermique probabiliste à la ville, il est indispensable de créer une représentation numérique de sa morphologie. Dans cet objectif, une approche est présentée qui s'appuie sur une cartographie (BD TOPO ou OpenStreetMap) d'empreintes de bâtiments (isolés ou mitoyens) sur lesquels des bâtiments seront générés. Le projet en cours porte sur l'étude des stratégies numériques à adopter pour la génération procédurale des bâtiments, en intégrant l'isolation, les ouvertures vitrées et les murs mitoyens. L'affiche poster présentera les solutions retenues pour respecter la conformité des surfaces maillées ainsi que des rendus infrarouges de scènes urbaines calculées avec le logiciel libre Stardis.

Etude numérique du refroidissement de la maille élémentaire d'un milieu poreux homogène traversé par une suspension de microparticules à changement de phase

Clément Rigal^{1,*}, Romain Noël², Agathe Chouippe¹, Denis Funfschilling¹, Yannick Hoarau¹

* ✉ : clement.rigal@univ-eiffel.fr

¹ Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (France)

² Université Gustave Eiffel (France)

Mots clés : Matériau à changement de phase, Milieu poreux, Eléments discrets

Résumé :

Le développement de systèmes de stockage thermique réversibles destinés à l'aménagement urbain suscite depuis quelques années un intérêt croissant. L'une des solutions techniques envisagées exploiterait un écoulement de fluide porteur de microcapsules contenant un matériau à changement de phase (mPCM) circulant dans une couche poreuse intégrée à la structure urbaine.

La compréhension des mécanismes physiques prenant place au sein de ce fluide et du solide qui l'environne, incomplète à ce jour, nécessite l'étude des différentes échelles du problème, et notamment celle du pore, souvent difficilement accessible à la mesure expérimentale et objet de nombreux travaux numériques.

La présente étude s'intéresse au comportement thermique d'un pore élémentaire représentatif d'un milieu poreux homogène initialement chaud traversé par des mPCM insérés à l'état solide à l'entrée du pore. L'étude vise à déterminer les températures moyennes atteintes par les trois phases (paroi solide, fluide et capsules) en régime permanent, ainsi que la fraction solide moyenne des microcapsules à la sortie du pore. Le transport des capsules dans le fluide est résolu au moyen de la méthode Boltzmann sur réseau, et les collisions entre particules et avec la paroi solide sont modélisées par éléments discrets (Discrete Element Methods). La fusion des capsules est modélisée par un algorithme simplifié mettant en rapport l'évolution de la température moyenne et de la fraction liquide moyenne de chaque capsule avec la chaleur qu'elle échange avec son environnement.

Les résultats obtenus permettent une meilleure compréhension des relations entre les températures des trois phases et peuvent servir à l'élaboration d'un modèle moins détaillé destiné à l'échelle métrique.

Numerical simulation of a Phase Change Material/Water Cylindrical Heat Exchanger : A Smart PCM Mobile Bathroom

Mustapha Faraji^{1,*}

* ✉ : farajimustapha@yahoo.fr

¹ Faculté des Sciences Aïn Chock [Casablanca] (Maroc)

Mots clés : Phase Change Material, Water coaxial heat exchanger

Résumé :

This paper focus on numerical modeling of discharging process of a Phase Change Material (PCM) / Water coaxial heat exchanger used for Domestic Water Heating (DWH) application. The mean target of the proposed Latent Heat Storage Unit (LHSU) is to ensure warm water during a longer period. The Heat Transfer Fluid (HTF) enters by the inner tube of annulus. The outer tube is filled by three different PCMs. The enthalpy method is used taking in to account natural convection in the equivalent thermal conductivity of PCM. The thermal balance between the HTF and the PCM is checked. The obtained equations are discretized using control volumes method. The obtained algebraic equations system is resolved using a TDMA algorithm. Results show that the outlet water temperature and the duration of asserting hot water are both function of the water inner temperature.

Analyse numérique des flux radiatifs permettant de calculer la température moyenne radiante d'un piéton dans une rue canyon en été

Hugo Matry¹, Matthieu Labat^{1,*}, Marion Bonhomme¹, Stéphane Ginestet¹

* ✉ : m_labat@insa-toulouse.fr

¹ Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions (France)

Mots clés : flux radiatif, modèle microclimat

Résumé :

A l'heure où les villes accueillent une population croissante, le phénomène d'îlot de Chaleur Urbain (ICU) exacerbé par le réchauffement climatique recueille un intérêt croissant. L'augmentation de l'albédo (proportion du rayonnement solaire réfléchi) sur les différentes surfaces de la rue est une des solutions qui permet de réduire les températures de surface. Largement étudié dans la littérature scientifique, cette solution est considérée comme un moyen efficace d'atténuation des ICU. Toutefois, le rayonnement solaire réfléchi sur les parois des rues à fort albédo peut aussi diminuer le confort thermique du piéton. Un modèle numérique de microclimat urbain à l'échelle de la rue est en cours de développement sur COMSOL Multiphysics 6.1. Un calcul radiatif du rayonnement solaire est réalisé sur une rue canyon en 3D. Un bilan thermique est résolu à la surface d'une rue canyon en 2D en prenant en compte le rayonnement solaire et ambiant, le flux conductif dans les parois ainsi que les transferts convectifs à la surface. L'influence de l'albédo du sol et des murs de la rue canyon est évaluée à partir du calcul de la température moyenne radiante (T_{mrt}) au niveau du piéton au centre de la rue canyon représentée en 3D. Cette température représente les échanges radiatifs provenant de plusieurs contributions (rayonnement solaire direct, solaire réfléchi, ambiant émis par les surfaces etc...) entre un corps humain et un environnement donné. La T_{mrt} est l'un des paramètres influençant le plus le confort thermique du piéton en extérieur. Une augmentation de l'albédo dans la rue tend à augmenter le rayonnement solaire réfléchi sur le piéton. Cependant, l'augmentation de l'albédo permet aussi de diminuer la température de surface des différentes parois, et donc, de réduire le rayonnement ambiant de la rue sur le piéton. Cette étude quantifie ces deux contributions radiatives sur le calcul de la T_{mrt} . Cette étude est réalisée à partir d'une simulation sur plusieurs jours d'été dans une rue canyon type.

Evaluation des propriétés thermiques des blocs d'argile compacts stabilisés avec des cendres de bois ou des déchets de poterie traditionnels

Said Bajji^{1,2}, Ahmed Saba^{1,*}, Youssef Naimi²

* ✉ : a.saba@uiz.ac.ma

¹ Information Processing Metrology Laboratory (LMTI)

² Physical Chemistry of Materials Laboratory, Ben M'Sick Faculty of Sciences, BP. 7955, Hassan II University of Casablanca, Casablanca (Maroc)

Mots clés : Valorisation des déchets, Déchets de poterie broyés, Caractéristiques thermiques, Caractéristiques mécaniques

Résumé :

Cette étude vise principalement à valoriser et recycler les déchets issus de la fabrication des poteries traditionnelles marocaines, tels que les cendres de bois et les déchets de poteries broyées, en les utilisant dans la production de briques écologiques à base d'argile provenant de la région de Tiznit. Des expériences en laboratoire ont été menées sur divers mélanges pour déterminer le dosage optimal permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques et thermiques idéales pour les briques. Les proportions de cendres de bois et de déchets de poterie broyés ont varié de 0 à 50 % par rapport à la masse totale du mélange sec. Des échantillons d'argile ont été utilisés pour fabriquer des briques et des spécimens cylindriques de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Les résultats indiquent que le dosage optimal de cendres de bois est de 5 % en combinaison avec l'argile. L'addition de déchets de poterie broyés a amélioré l'absorption des blocs, et les valeurs de résistance mécanique les plus élevées ont été obtenues avec un dosage de 20 % de déchets de poterie. En remplaçant 5 % de l'argile par des cendres de bois ou 20 % par des déchets de poterie broyés, il a été possible de produire des blocs écologiques présentant une résistance thermique similaire à celle des matériaux de construction traditionnels, avec des propriétés thermiques améliorées. Ces résultats suggèrent la possibilité de créer de nouveaux matériaux de construction isolants adaptés à diverses applications de construction.

Développement et validation d'un outil de simulation numérique pour l'étude du masquage radiatif des brouillards multi-composants réactifs.

Etienne Chopard^{1,*}, Vincent Robin¹

* ✉ : etienne.chopard@ensma.fr

¹ Institut Pprime (France)

Mots clés : Masquage radiatif, Ecoulements diphasiques, Transfert radiatif

Résumé :

Les propriétés de masquage des brouillards d'eau sont largement utilisés dans divers domaines, de la lutte contre les incendies (écran rideau thermique) à la protection des cultures contre les températures extrêmes et même dans l'industrie du divertissement. Selon l'application visée, les caractéristiques du brouillard doivent être ajustées avec précision. Par exemple, la taille des gouttelettes doit être suffisamment grande pour retarder leur évaporation, tout en demeurant suffisamment petite pour permettre une diffusion et une absorption efficaces du rayonnement. La théorie de Mie, développée au début du vingtième siècle, demeure une référence essentielle pour comprendre et prédire la diffusion de la lumière par des particules sphériques, ce qui est crucial pour déterminer les propriétés optiques des brouillards. Cependant, dans les applications pratiques, le brouillard est contrôlé ou affecté par divers autres mécanismes physiques tels que le mouvement des fluides, les interactions entre les gouttelettes, leur évaporation, ainsi que des réactions chimiques qui peuvent également influencer de manière significative le rayonnement. Pour faciliter la compréhension de ces interactions et pour dimensionner efficacement de nouvelles expériences représentatives de configurations complexes, il est indispensable de développer des outils numériques intégrant les aspects multiphysiques de ces écoulements. Dans ce cadre, l'objectif de ce travail est d'intégrer dans fireFOAM (solveur multiphysique open-source), les éléments clés du rayonnement, de la théorie de Mie, de la mécanique des fluides réactifs en milieu diphasique. La validation est effectuée par le biais d'expériences numériques canoniques permettant d'évaluer les résultats du solveur développé en les confrontant aux résultats théoriques ainsi qu'à d'autres résultats numériques. Le solveur développé adopte une approche eulérienne pour résoudre la phase porteuse et une approche lagrangienne pour modéliser la phase dispersée. La Méthode des Ordonnées Discrètes (DOM) est utilisée pour résoudre l'équation du transfert radiatif dans le contexte des écoulements chargés de gouttelettes. Ce solveur fait appel à une fonction de phase tabulée, intégrant les caractéristiques des gouttelettes et des longueurs d'ondes incidentes, résultant d'un calcul préliminaire basé sur un solveur de Mie. Ces développements sont validés sur une configuration où une plaque plane chauffée est placée à l'intérieur d'un collimateur pour obtenir un rayonnement unidirectionnel. Ainsi, la diffusion induite par le nuage de gouttelettes peut être comparée aux résultats analytiques. L'objectif à terme est d'étudier l'influence de la composition chimique du brouillard et de ces interactions avec des particules réactives dispersées en son sein.

Spatiotemporal variability of solar radiations within an urban context : a characterisation by means of Principal Component Analysis

Guillaume Le Gall^{1,*}, Martin Thebault¹, Cyril Caliot², Julien Ramousse¹

* ✉ : guillaume.le-gall@univ-smb.fr

¹ Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (France)

² LMAP UPPA CNRS (France)

Mots clés : Principal Component Analysis, Orthogonal decomposition, Shortwave radiations, Spatiotemporal variability, Urban environment

Résumé :

In a society where a substantial part of the global energy yield is being directly expended at the city scale, urban areas appear as serious candidates for the production of solar energy. The high occurrence of diverse obstacles like buildings, vegetated elements and other urban infrastructures creates an aggregation of countless singular geometries with diverse morphological characteristics and material optical properties. This inherently causes important disruptions to incident solar radiations, adding on their natural variability brought about by the site specificities and diurnal/seasonal cycles. The field of irradiance received by a specific urban region (e.g. façade, building, district) may thus rapidly become the result of complex miscellaneous interactions between many degrees of freedom. In the presence of such high-dimensional phenomena expanding across a wide range of spatial and temporal scales, specific methods can be used to appreciate their global dynamics. Especially, Principal Component Analysis (PCA) has been widely adopted and validated in this context. PCA indeed decomposes the covariance of fluctuations in the original multivariate signal, and come up with a new set of uncorrelated features being linear combinations of initial variables. Their corresponding modes of variation now define a new basis of orthonormal features for the original signal pointing in the direction of its main variations, i.e. capturing most energy in the dataset. An approach is proposed here for analysing the variations in space and time of the solar resource within an urban context by means of PCA. A parametric investigation is conducted on a set of theoretical 100 m × 100 m urban districts, defined as homogeneous arrangements of cuboid-like buildings, with various typological indicators (Total Site Coverage, Global Aspect Ratio) and surface materials (Lambertian, highly-specular) at a typical mid-high latitude. For each configuration, the shortwave radiative flux density on the facets of the central building is modelled via backwards Monte-Carlo ray tracing [1] over a full year and under clear sky conditions, with a 15 min timestep and 1 m spatial resolution. PCA is subsequently applied to the simulated radiative fields to extract dominant modes of variation. First results validate energy-based orthogonal decompositions like PCA as efficient tools for characterising the variability distribution of multivariate phenomena in this context [2]. The issued separate representation of space and time variables allows for their independent examination, helping the identification of district areas subjected to important spatial and temporal variations of the solar resource. Characteristic time scales are clearly represented across successive orders of decomposition. Information about the district morphology is also obtained, with the contribution of surrounding geometries being portrayed by specific spatial modes. Similar prevalent variables are further repetitively encountered across multiple evaluated surfaces, but at different modal ranks. [1] Caliot, C., Schoetter, R., Forest, V., Eymet, V. and Chung, T., (2022). Model of Spectral and Directional Radiative Transfer in Complex Urban Canopies with Participating Atmospheres, *Boundary-Layer Meteorology*. [2] Le Gall, G., Thebault, M., Caliot, C. and Ramousse, J., (2023). Principal Component Analysis for the characterisation of spatiotemporal variations of the solar resource in urban environments. In : *Proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference IHTC-17*, Cape Town, South Africa, 14–18 August, Begell House Inc.

Work In Progress

Anisothermal gas–particle flow simulations for concentrated solar applications

Gabriel Ologaray^{1,*}, Edouard Butaye¹, Adrien Toutant¹, Samuel Mer¹, Françoise Bataille¹

* ✉ : gabriel.ologaray@univ-tlse3.fr

¹ Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES)

Mots clés : Concentrated Solar Power, Gas particle flow simulations, Thermal energy storage

Résumé :

Concentrated solar power (CSP) is a technology designed to harness the sun's energy. In contrast with photovoltaics (PV), CSP plants use a different approach to generate electricity. CSP plants work by concentrating sunlight into a focalized beam aimed at a receiver. The high-temperature receiver then transfers its thermal energy to a working fluid, operating in a thermodynamic cycle for electric power generation. Compared to PV, CSP systems are capable of offering a more reliable supply of electricity when coupled with thermal energy storage (TES), thus offsetting one of PV's major challenges. Currently used 1st and 2nd generation CSP plants typically use oil, steam, or molten salt as the working fluid. Their cycle efficiencies lie in the 28–44 % range, with peak temperature typically not exceeding 550°C to prevent chemical degradation. 3rd generation CSP (under research) aims at greater than 50 % efficiency by increasing peak temperatures to at least 720°C. This would be made possible by using new types of fluids, such as gas–particle fluidized beds. To make use of gas–particle beds, receiver wall-to-bed heat transfer needs to be studied and characterized. For such flows, numerical modeling is a powerful tool providing full access to the flow's data under various operating conditions, without disrupting it. Particle-Resolved Numerical Simulation is the most accurate numerical modeling technique, capturing the full range of scales in the flow. In our research, Particle-Resolved Numerical Simulation implemented with a front-tracking method (capturing the particles' interfaces) has been successfully carried out [1]. Results for a liquid–solid particle bed with more than 2000 particles under various fluidization configurations are in agreement with experimental results [2]. For gas–particle flows, due to a higher $\rho_{\text{solid}}/\rho_{\text{fluid}}$ density ratio, simulations become more challenging. To this date, several advancements have been made. Our method successfully simulates the fall and rebound against a wall of a solid particle in the air, under “reasonable” resolutions. In current development, we are simulating an air–particle fluidized bed as a way to fully solve wall-to-bed heat transfer in flow configurations representative of solar receivers. [1] Hamidi et al., Assessment of a coupled VOF-Front-Tracking/DEM method for simulating fluid–particles flows, *Int. J. Multiph. Flow* (2023). [2] Butaye et al., Development of Particle Resolved - Subgrid Corrected Simulations : Hydrodynamic force calculation and flow sub-resolution corrections, *Comput. Fluids* (2023).

Analyse comparée de méthodologies de modélisation du couplage conduction-rayonnement au sein de matériaux poreux semi-transparentes

Léa Penazzi^{1,*}, Stéphane Blanco², Cyril Caliot³, Jérémie Dauchet⁴, Simon Eibner⁵, Mouna El Hafi⁵, Vincent Eymet⁶, Olivier Farges⁷, Yann Favennec⁸, Richard Fournier⁹, Fabrice Rigollet², Denis Rochais¹⁰, Benoit Rousseau¹¹, Frédéric Topin¹², Jerome Vicente¹, Gerard Vignoles¹

* ✉ : lea.penazzi@univ-amu.fr

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343 (France)

² Laboratoire PLasma et Conversion d'Energie (LAPLACE)

³ CNRS, UPPA, E2S, LMAP (1 Allée du Parc Montaury, Anglet, France France)

⁴ Institut Pascal, axe GePEB (INSTITUT PASCAL Campus Universitaire des Cézeaux 4 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière France)

⁵ Centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement (RAPSOEE)

⁶ Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS-Université de Poitiers-ENSMA, IUT d'Angoulême (France)

⁷ Meso-Star SAS (France)

⁸ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

⁹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (Ecole Polytechnique Univ.Nantes 3 Rue Christian Pauc - BP 50609 44306 NANTES CEDEX 3 France)

¹⁰ Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (France)

¹¹ CEA Le Ripault (BP 16 37260 Monts France)

¹² Laboratoire de Thermique et d'Energie de Nantes (France)

¹³ Laboratoire des Composites Thermostructuraux (3 allée de La Boétie F-33600 Pessac France)

Mots clés : Méthodes numériques, Transferts de chaleur couplés, Conduction, Rayonnement, Milieux Poreux

Résumé :

Le GDR CNRS TAMARYS a pour objectif de rassembler les spécialistes de la science des matériaux et de la science des transferts thermiques pour résoudre les obstacles multi-échelles et multi-physiques rencontrés dans le développement de procédés et systèmes industriels dominés par les transferts radiatifs. Ce groupement de recherche est doté d'un Club des Partenaires Industriels pour lequel les travaux académiques autour du couplage conduction-rayonnement au sein de milieux semi-transparentes hétérogènes représentent un des sujets d'intérêt communs définis pour pérenniser le développement de futurs systèmes innovants à haute température. Pour leurs dimensionnements ultérieurs, les partenaires industriels du GDR expriment souvent leur besoin de quantifier des propriétés apparentes, c'est-à-dire, tenant compte du transfert thermique couplé conduction-rayonnement (stationnaire ou instationnaire) même si ces grandeurs n'ont aucun caractère intrinsèque lorsque les calculs sont effectués sur un domaine qui n'est pas un VER (Volume Élémentaire Représentatif). Les demandes récurrentes ont trait aux notions de conductivité et de diffusivité apparentes. Par ailleurs, la communauté académique française est particulièrement active à l'échelon mondial dans ce domaine caractérisé par des modélisations, le plus souvent parallélisées, au sein des représentations digitalisées 3D des matériaux poreux d'intérêt. Afin de répondre au besoin exprimé par les industriels tout en ayant recours aux savoir-faire présents au sein des équipes de ce groupement de recherche académique, le GDR TAMARYS avec le soutien de son Club des Partenaires Industriels a initié un travail de recherche visant à conduire un exercice d'analyse comparée des différentes méthodes de résolution des transferts de chaleur par conduction et rayonnement au sein d'un matériau poreux semi-transparent. Cette dynamique de travail permet à plusieurs équipes académiques et industrielles du GDR de comparer leur méthodologie numérique avancée sur des images 3D communes. Plus particulièrement, la géométrie

identifiée est celle de la gyroïde, géométrie de la famille des TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces), celle-ci est partagée par les différentes équipes souhaitant s'impliquer dans l'exercice. Un ensemble de jeux de paramètres à la fois géométriques, thermo-physiques et liés aux conditions limites sont considérés pour la résolution des transferts couplés au sein de l'architecture 3D. Afin de quantifier numériquement la conductivité ou diffusivité apparente, certaines techniques expérimentales classiques de mesure de ces propriétés vont être reproduites, qu'elles soient stationnaires ou instationnaires : méthodes de la plaque chaude gardée, du fil chaud ou du plan chaud ainsi que la méthode flash. Le travail de recherche présenté met en avant le travail collaboratif entre les cinq principales équipes impliquées dans cet exercice d'analyse, à savoir, les laboratoires LCTS (Pessac), LTeN (Nantes), IUSTI (Marseille), le CEA Le Ripault (Monts), l'Institut Pprime (Poitiers), ainsi que le groupe EDStar (partenaires académiques[1] en lien avec l'entreprise Méso-Star) à travers les résultats et avancées produits jusqu'à présent. [1] : LAPLACE (Toulouse), LMAP (Anglet), Institut Pascal (Clermont-Ferrand), RAPSODEE (Albi), LEMTA (Nancy).

Thème 4

Métrologie et Techniques Inverses

Modèle convolutif pour l'estimation des températures de jonctions au sein d'un onduleur triphasé . . .	78
Identification de la conductivité thermique des polymères semi-cristallins en cours de transformation	79
Méthodes de quantification de la température d'émission d'un verre sodo-calcique pour la cartographie 2D de son émissivité apparente en conditions extérieures	80
Caractérisation de matériaux de stockage thermique par bilan entropique : analyse des irréversibilités et mesure des propriétés.	81
Vers une méthodologie expérimentale pour l'évaluation du confort thermique extérieur, application au campus de l'ESTP à Cachan	82
Caractérisation de matériaux nanostructurés par microscopie thermique à sonde locale associée à une méthode inverse	83
Estimation du flux de chaleur sur les composants face au plasma du Tokamak WEST par réseau de neurones	84
Méthode de détection et de reconstruction de défauts internes et débouchants dans des pièces métalliques	85
Défis et Innovations en Thermique des Semi- Conducteurs WBG : Modélisation Dynamique et Validations Expérimentales	86
Imagerie en thermotransmittance : premières tentatives vers une super résolution	87
Mesure de température d'interface lors d'un soudage par résistance par point	88
Contrôle Non Destructif Quantitatif d'une Résistance Thermique d'Interface de Faible Valeur par Mesure de Températures Bifaces	89
Estimation du flux de chaleur extrait à la paroi par l'impact d'une goutte	90
Temporal Averaging Method for Improved NETD of High-Speed Infrared Cameras	91
Caractérisation des transferts de masse au sein des membranes polymères d'électrolyseurs microfluidiques par spectroscopie infrarouge.	92
Mesure sans contact de champs de température dans les milieux semi-transparents par thermotransmittance infrarouge	93

Modèle convolutif pour l'estimation des températures de jonctions au sein d'un onduleur triphasé

Ali El Arabi^{1,*}, Denis Maillet¹, Nicolas Blet¹, Benjamin Remy¹

* ✉ : ali.el-arabi@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine (France)

Mots clés : Onduleur triphasé, Température de jonction, Modèle convolutif

Résumé :

La température de jonction est un paramètre très important lors de la mise en place des stratégies de contrôle commande des composants électroniques de puissance. Dans les faits, les transistors MOSFET offrent une fréquence de commutation assez élevée et permettent un transit de puissances électriques relativement importantes. La commutation à haute fréquence et l'important courant qui traverse ses transistors engendrent un échauffement conséquent, surtout au niveau de la jonction. La température de jonction doit rester constamment au-dessous d'une température seuil de l'ordre de 120°C sous peine de dégradation. De plus, les variations rapides des puissances électriques traversant les transistors créent des variations assez rapides des températures des jonctions. Le problème est que ces températures ne sont pas accessibles par mesure directe. Dans la littérature, plusieurs modèles électriques ou thermoélectriques ont été présentés. Dans le cadre du présent travail, un modèle convolutif a été développé et permet l'estimation de six températures de jonctions, à partir des températures mesurées par six capteurs placés dans des endroits bien choisis dans la semelle des composants. Il se base sur une étape d'identification, une étape de vérification et finalement une étape de validation. Dans un premier temps, les transmittances propres (entre chaque capteur et la jonction la plus proche) et les transmittances de couplage sont identifiées à partir d'un modèle numérique tridimensionnel sous COMSOL Multiphysics. On vérifie ensuite que les températures de jonctions calculées par le modèle convolutif à partir des températures des capteurs correspondent bien aux températures du modèle numérique du même jeu de données. Enfin, le modèle est validé (ou non) sur un nouveau jeu de données. Les résultats obtenus par ce modèle convolutif sont prometteurs car l'estimation des six températures de jonction est non biaisée. Une étude avec bruit a été réalisée et l'estimation s'avère également non biaisée. Il est à noter que le modèle convolutif est onéreux en termes de ressources de calcul (temps de calcul de l'ordre de la minute) mais reste largement meilleur qu'un modèle numérique complet. La mise en place d'un modèle autorégressif à variable exogène peut être une solution moins onéreuse du fait d'un nombre moindre de paramètres à identifier. Par ailleurs, un banc expérimental a été mis en place où la température des jonctions est mesurée par thermographie infrarouge. L'objectif de l'étude expérimentale est de valider la qualité des modèles développés numériquement.

Identification de la conductivité thermique des polymères semi-cristallins en cours de transformation

Rita Moussallem^{1,*}, Elissa El Rassy¹, Jalal Faraj², Nicolas Lefevre¹, Jean-Luc Bailleul¹

* ✉ : rita.moussallem@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et d'Énergie de Nantes (France)

² Lebanese International University (Liban)

Mots clés : Polymères semi, cristallins, Méthode inverse, Transformation des polymères

Résumé :

La qualité des produits industriels dépend principalement de la connaissance et de la maîtrise du comportement des matériaux durant les différentes phases de leurs fabrications. Il est ainsi indispensable de modéliser finement les transferts thermiques ayant lieu durant les procédés de fabrication. Cependant, cette modélisation exige une connaissance et une caractérisation fidèle des propriétés thermophysiques des matériaux telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et le volume spécifique, durant toutes les étapes de production et toutes les transformations subies par le matériau. Ces propriétés sont bien identifiées à l'état solide mais leurs mesures à l'état liquide (pour les polymères semi-cristallins) sont moins maîtrisées et en cours de transformation elles ne sont pas maîtrisées. Il est thermiquement correct de modéliser l'évolution de la capacité thermique et de la masse volumique en cours de transformation par une loi de mélange. Cependant, les lois de mélange ne sont pas applicables à la conductivité thermique qui n'est pas une propriété extensive. Le but principal de ce travail de recherche est d'élaborer une méthode inverse dédiée à l'identification de la conductivité thermique en fonction de deux champs couplés qui sont la température et le degré de transformation, couplée avec un banc de mesures original. Un modèle numérique en différences finies est ainsi développé pour simuler le comportement thermique d'un polymère en cours de transformation. Un algorithme d'optimisation hybride couplant une méthode stochastique avec une méthode déterministe est adopté pour la résolution du problème complexe qui est non linéaire. La conductivité thermique est estimée, sans imposition d'un modèle évolutionnaire, par reconstruction du profil de température mesuré au centre d'un thermo-plastique durant sa transformation. Les mesures de température sont réalisées à l'aide d'un moule instrumenté monté sur une presse pneumatique équipée d'un système de chauffage et de refroidissement. Le refroidissement de la matière est assuré par circulation d'air ou d'eau dans la partie supérieure du moule et dans les deux plateaux de la presse. Trois thermocouples sont tendus dans la cavité où le polymère est soumis à des refroidissements sous différentes vitesses. La variation de la vitesse de refroidissement permet d'élargir l'intervalle des températures de cristallisation étudiées. Les premières mesures ont été réalisées sur un polypropylène en cours de sa cristallisation anisotherme. Une campagne expérimentale visant à caractériser la cinétique de cristallisation du polymère ainsi que la dépendance en température et transformation de sa densité et de sa chaleur spécifique, est préalablement achevée. Ainsi, les conductivités thermiques sont identifiées en minimisant l'écart entre ces mesures expérimentales et le modèle thermique direct. Les premiers résultats prouvent que les valeurs de la conductivité thermique identifiées, en cours de cristallisation, reconstruisent les profils de température mesurés avec une plus grande précision que la loi de mélange classiquement utilisée [1]. Des calculs d'identification sont en cours pour estimer les valeurs de conductivité pour plusieurs vitesses de refroidissement. Le but de la caractérisation sous plusieurs vitesses de refroidissement, est d'aboutir à des conductivités thermiques correspondantes à une abondance de combinaison entre la température et la cristallinité relative. [1] R. Le Goff, G. Poutot, D. Delaunay, R. Fulchiron, et E. Koscher, « Study and modeling of heat transfer during the solidification of semi-crystalline polymers », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no 25, p. 5417-5430, déc. 2005, doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.015.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-005>

Méthodes de quantification de la température d'émission d'un verre sodo-calcique pour la cartographie 2D de son émissivité apparente en conditions extérieures

Samy Brazane^{1,*}, Olivier Riou¹, Laurent Ibos¹, Fabien Delaleux¹, Jean-Félix Durastanti¹

* ✉ : samy.brazane@u-pec.fr

¹ Centre d'Etudes et Recherches en Thermique, Environnement et Systèmes [Créteil] (France)

Mots clés : Température d'émission, Verre sodo calcique, Emissivité apparente, Thermographie infrarouge

Résumé :

Nous vivons actuellement une transition énergétique des combustibles fossiles vers les énergies renouvelables. L'une des principales tentatives pour relever ce défi se concentre sur l'exploitation de l'énergie solaire. Les systèmes d'énergie solaire connaissent une croissance rapide dans le monde entier. Deux technologies ont été développées pour exploiter l'énergie solaire : le photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire concentrée (CSP). La production d'électricité décarbonée peut également être réalisée à l'aide de centrales hybrides qui combinent différentes sources d'énergie solaire pour produire de l'électricité. En raison de son faible coût et de ses propriétés optiques adéquates, le verre sodo-calcique est omniprésent dans les systèmes solaires. Le verre sodo-calcique offre le meilleur compromis entre les performances optiques et mécaniques et la possibilité d'être produit à grande échelle. Les centrales solaires assurent leur production d'énergie grâce à de grandes surfaces de captage. Le maintien de la capacité des centrales solaires nécessite une transmittance optique du verre proche de sa valeur inaltérée (0,9) pour les modules PV et les miroirs CSP. Les moyens permettant de localiser les unités non conformes sont limités : la production d'énergie peut être contrôlée en mesurant le rendement électrique de la centrale ou par contrôle visuel. A l'échelle d'une grande installation, ces contrôles sont chronophages et ne permettent pas de quantifier les pertes de transmission optique sans recourir à une caractérisation en laboratoire (spectrométrie) basée sur un échantillonnage aléatoire des surfaces analysées. Dans ce contexte, le laboratoire du CERTES-UPEC développe un outil de contrôle sans contact basé sur l'émissivité apparente. Cet indicateur est obtenu en exploitant les capacités métrologiques et d'imagerie des caméras thermiques. Les résultats en condition de laboratoire ont démontré l'efficacité de la méthode pour la détection de l'érosion et des effets de la chaleur humide. En effet, une corrélation entre les variations d'émissivité apparente en infrarouge et de la transmittivité du verre dans le visible a été mise en évidence. Le verrou scientifique qui se pose pour employer cet indicateur en conditions extérieures est la quantification de la température d'émission du verre. Pour cela, nous emploierons deux méthodes : la première consiste à utiliser des mires émissives déposées sur le panneau (peinture à base de graphite) tandis que la seconde emploie un filtre infrarouge dont la longueur d'onde centrale est située au point de Christiansen du verre. Les performances des deux méthodes seront comparées. Nous concluons quant à l'applicabilité de cet outil pour le contrôle dans le temps de la transmittivité du verre soumis aux aléas climatiques.

Caractérisation de matériaux de stockage thermique par bilan entropique : analyse des irréversibilités et mesure des propriétés.

Régis Olivès^{1,*}, Jean-Marie Mancaux¹

* ✉ : olives@univ-perp.fr

¹ Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (Tecnosud, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan France)

Mots clés : Stockage thermique, Bilan entropique, Sollicitation dynamique

Résumé :

Le stockage thermique repose sur la sollicitation dynamique de matériaux, c'est-à-dire une succession de phases de charge et de décharge. Afin d'évaluer les performances du module de stockage, il est donc nécessaire de déterminer les propriétés des matériaux en régime dynamique. Or, le bilan énergétique n'apporte d'information que sur l'isolation du module et non sur les performances du matériau de stockage. Ce qui semble plus intéressant est donc l'étude du bilan entropique qui renseigne sur les irréversibilités et donc conduit à la possibilité de définir un rendement exergetique du stockage. Partant de ce constat, nous basons la caractérisation du matériau sur l'analyse entropique [1]. La résolution de l'équation de bilan entropique peut conduire à l'identification de propriétés thermophysiques. L'étude des irréversibilités et de la production d'entropie lors du transfert par conduction permet de déterminer par exemple l'effusivité d'un matériau soumis à une sollicitation dynamique [2]. La méthode expérimentale consiste en la mesure et le traitement des températures superficielles et des flux de chaleur. Ainsi, le banc expérimental est constitué d'une résistance chauffante qui impose un flux de chaleur à un échantillon. Un capteur planaire, placé entre la résistance et l'échantillon mesure à la fois le flux et la température. On obtient ainsi le flux entropique à la surface de l'échantillon. La résolution de l'équation de bilan entropique peut conduire dans certains cas à une expression analytique reliant l'effusivité à l'intégrale sur le temps du flux entropique. Des mesures sont effectuées sur différents matériaux. Les solutions analytiques et des simulations numériques sont comparées aux résultats expérimentaux. Références [1] Olivès R., Mancaux J.-M. Détermination et analyse des irréversibilités dans des matériaux hétérogènes soumis à des sollicitations thermiques dynamiques. Congrès SFT, Nantes, 2019 [2] Bartoli C. Analysis of thermal irreversibilities in a homogeneous and isotropic solid. International Journal of Thermal Sciences 44, 2005.

Vers une méthodologie expérimentale pour l'évaluation du confort thermique extérieur, application au campus de l'ESTP à Cachan

Arnaud Lapertot^{1,*}, Anne Dony¹, Vincent Basecq¹, Laurence Durivault-Reymond², Abboud Hajjar²

* ✉ : alapertot@estp.fr

¹ Institut de Recherche, ESTP, 94230 Cachan, France (France)

² Core Center by COLAS, 78771 Magny les Hameaux, France (France)

Mots clés : Confort et inconfort thermique extérieur, Ilot de chaleur urbain, Mesure expérimentale

Résumé :

La surchauffe urbaine est actuellement une question dominante en urbanisme. L'un des aspects d'étude concerne son impact sur les usagers dans les espaces urbains ouverts, en particulier la contrainte thermique estimée à l'aide d'indices de confort thermique [1]. Pour évaluer ces impacts, il est nécessaire de caractériser les conditions microclimatiques, ce qui peut être accompli par simulation [2] mais aussi par des mesures physiques [3]. Le campus de Cachan se positionne comme un exemple de quartier urbain engagé dans la transformation de ses huit hectares en un vaste laboratoire naturel. L'objectif de cette étude consiste d'abord à évaluer le confort thermique à partir de données expérimentales recueillies puis à étudier les enquêtes avec usagers sur le site de l'ESTP Cachan. Pour ce faire, les deux indices de confort thermique extérieur seront comparés, à savoir UTCI et PET [4,5]. Ils reposent sur différentes approches pour caractériser la sensation et l'inconfort thermique, en prenant en compte des facteurs métaboliques, vestimentaires et des limites physiologiques. Enfin un travail de comparaison des indices est proposé, afin de mettre en évidence leur sensibilité aux conditions physiques mesurées. Le dispositif expérimental comprend une centrale météorologique installée sur le toit du bâtiment du centre de recherche de l'ESTP, ainsi qu'une station de mesure microclimatiques. La position de la station de mesure a été choisies en fonction des flux de passage et d'activités des usagers avec des variations de revêtements de voiries et d'expositions par rapport aux bâtiments existants. Ce cas d'étude se démarque par la diversité des points de mesures et des conditions rencontrées : couloir d'air, effet de canyon thermique, et trois types de revêtements. Ainsi il offre un regard sur la question microclimatique à l'échelle de l'utilisateur, et sur la différence et la complémentarité des indices de confort utilisés. L'acquisition de données pendant la période caniculaire de l'été 2022, a mis en évidence des niveaux de stress thermique très élevés, avec notamment un indice UTCI dépassant les 38°C notamment aux points bitumeux et un PET important. [1] Wang Y, de Groot R, Bakker F, Wörtche H, Leemans R. Thermal comfort in urban green spaces : a survey on a Dutch university campus. *Int J Biometeorol*. 2018 ;62(6) :945-954. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1193-0> [2] Nady, R. & Ragheb, R. (2022). Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. *Ain Shams Engineering Journal*. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.004> [3] Grosdemouge, Virginie, Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des EcoQuartiers, Thèse de doctorat Physique du bâtiment et génie urbain La Réunion 2020, supervisé par Garde, François et David, Mathieu. <http://www.theses.fr/2020LARE0033> [4] Jendritzky, G., de Dear, R. & Havenith, G. UTCI—Why another thermal index ? *Int J Biometeorol* 56, 421–428 (2012). DOI : <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7> [5] Höpe P., The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment *Int J Biometeorol* (1999) 43 :71–75

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-037>

Caractérisation de matériaux nanostructurés par microscopie thermique à sonde locale associée à une méthode inverse

Nathaly Chaaraoui^{1,*}, Nathalie Trannoy¹, Thierry Duvaut¹

* ✉ : nathaly.chaaraoui@univ-reims.fr

¹ Université de Reims Champagne Ardenne (France)

Mots clés : Microscopie thermique, Matériaux nanostructurés, Méthode Inverse, Microscopie à force atomique

Résumé :

Les nanotechnologies exigent des méthodes spécifiques de caractérisation pour les nano-systèmes et les nanomatériaux. Une compréhension avancée du transfert de chaleur à l'échelle nanométrique et des propriétés thermiques des matériaux nanostructurés est cruciale pour l'innovation de nouveaux matériaux. Les propriétés thermiques des couches minces ont été minutieusement explorées pour divers matériaux, et la microscopie thermique à sonde locale (S_{Th}M), basée sur la microscopie à force atomique (AFM), s'avère être un outil essentiel pour étudier localement le comportement de ces matériaux et les mécanismes de transfert de chaleur à l'échelle micro/nanométrique. Ce projet vise à évaluer les propriétés thermiques locales de matériaux nanostructurés. A cette fin, deux échantillons à la nanostructures enterrée ont été spécialement conçus. Le premier présente une marche triangulaire subsurfacique en SiO₂ déposée sur un substrat en silicium, recouverte de SiO₂ CVD poli. L'interface SiO₂/Si est linéaire, avec une épaisseur variant entre 400 et 2150 nm. Le second est composé de trois marches de SiO₂ d'une épaisseur de 260 nm recouvertes d'une couche de SiO₂, déposées sur un substrat de silicium. Ces deux géométries différentes visent à étudier la réponse de la microsonde en terme de structuration interne de l'échantillon et ainsi évaluer la conductivité thermique locale du SiO₂. Pour obtenir des informations thermiques sur les matériaux nanostructurés, le microscope thermique (S_{Th}M) doit être équipé d'un capteur thermique, permettant l'acquisition simultanée d'images topographiques et thermiques. Une sonde thermosensible micrométrique en Wollaston a été sélectionnée à cette fin. Pour interpréter les résultats expérimentaux de S_{Th}M, un modèle de transfert de chaleur par la méthode des éléments finis (FEM) du système sonde-échantillon a été développé pour (a) étudier l'impact de la structure de l'échantillon sur le signal thermique de la sonde, et (b) caractériser la conductivité thermique locale. A partir du modèle numérique, une technique inverse a été mise en œuvre en utilisant l'algorithme Levenberg-Marquardt combinant deux méthodes inverses : la méthode de Gauss-Newton et la méthode de descente conjuguée, pour évaluer la conductivité thermique locale à partir des puissances dissipées par la sonde. Cela a permis de déduire celle de la couche de SiO₂ d'épaisseur variable sur le substrat de silicium. Le modèle numérique, basé sur le couplage électrothermique de la sonde/échantillon, évalue le flux dissipé par l'élément thermorésistif et vers l'échantillon. La comparaison entre la simulation et les mesures expérimentales démontre que le modèle reproduit les profils thermiques expérimentaux pour l'échantillon avec une épaisseur variable de SiO₂. Il est à noter que la conception de l'échantillon assure une résistance thermique de contact constante à chaque point de mesure. Nos résultats montrent une diminution de la conductivité thermique avec l'épaisseur de la couche de SiO₂. Ces constatations ont été confirmées par une analyse supplémentaire effectuée sur une nanostructure présentant une configuration distincte. Il en résulte que le matériau, au-delà de 1400 nm, adopte un comportement similaire à celui d'un échantillon massif, tandis qu'en dessous de cette valeur, la conductivité thermique que nous avons pu quantifier dépend de l'épaisseur du matériau.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-039>

Estimation du flux de chaleur sur les composants face au plasma du Tokamak WEST par réseau de neurones

Yann Anquetin^{1,*}

* ✉ : yann.anquetin@univ-amu.fr

¹ Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (France)

Mots clés : méthode inverse, réseau de neurones

Résumé :

Certains environnements expérimentaux ne permettent pas d'installer un instrument de mesure directement dans la région d'intérêt. Cela peut être à cause d'un environnement nocif pour le capteur, l'innascibilité de la zone, ne pas polluer l'expérience etc... Dans ces situations il est possible d'instrumenter une zone proche et de mesurer les conséquences du phénomène. On peut alors utiliser des méthode inverses pour remonter des conséquences vers les causes. Pour la résolution de problème inverse en thermique, ces méthodes sont fiables et précises mais peuvent être coûteuses en temps de calcul si le modèle est complexe ou si le nombre de paramètres à estimer est grand. C'est notamment le cas dans une machine de fusion (Tokamak) pour des composants face au plasma soumis à des flux de chaleurs important allant jusqu'à 10MW/m² et nécessitant une instrumentation enfouie dans le composant pour assurer son intégrité. De précédents travaux [1] ont permis d'estimer les flux de chaleur à la surface de ces composants à partir des mesures enfouies à l'aide d'une résolution itérative par gradient conjugués couplée à un modèle non-linéaire 3D instationnaire induisant un grand temps de calcul (typiquement plusieurs jours de calcul pour quelques dizaines de secondes d'expérience). Ces temps de calculs importants ne permettent pas l'utilisation de ces outils lors de sessions expérimentales où les analyses doivent être réalisées en quelques minutes. On cherche à développer un outil permettant d'obtenir une première estimation, éventuellement moins précise mais en un temps très court, du flux en surface à l'état stationnaire. Le développement de l'intelligence artificielle comme outil offre une nouvelle manière de résoudre ces problèmes inverses. Cet article s'intéresse au développement d'un réseau de neurones permettant d'estimer la forme et l'intensité d'un flux de chaleur à partir de mesures de températures enfouies dans un composant face au plasma pendant la phase stationnaire d'une expérience dans le Tokamak WEST. L'apprentissage supervisé consiste à donner à un algorithme d'apprentissage profond un grand nombre de données étiquetées avec la valeur des paramètres recherchés afin qu'il détermine un lien entre données (11 mesures de températures réparties le long du composant) et paramètres (4 nécessaires pour décrire la forme du flux de chaleur). La base de données (plus de 100 000 cas) est construite à partir du modèle 3D non-linéaire stationnaire de notre composant avec en entrée un flux surfacique connu en forme et intensité défini par 4 paramètres. Une fois le réseau de neurone entraîné, il permet de prédire un jeu de paramètres du flux de chaleur à partir des températures. Dans cet article, la première partie porte sur la forme de flux considérée ainsi que l'analyse de sensibilité des paramètres décrivant sa distribution spatiale. Le développement et l'entraînement du réseau de neurones sont présentés dans la partie 2. Finalement la partie 3 présente les résultats de l'utilisation du réseau de neurones sur des données expérimentales. [1] Anquetin, Y. et al. Fusion Engineering and Design 190, 113480 (2023).

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-040>

Méthode de détection et de reconstruction de défauts internes et débouchants dans des pièces métalliques

Malo Lecorgne^{1,*}, Emanuelle Abisset-Chavanne¹, Marie-Marthe Groz¹, Alain Sommier¹, Christophe Pradère²

* ✉ : malo.lecorgne@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France)

² Epsyl (France)

Mots clés : Contrôle non destructif, Détection de défauts, Reconstruction spatio temporelle

Résumé :

La détection et le contrôle de défauts débouchants ou sous-jacents dans des pièces métalliques est un enjeu industriel important dans de nombreux domaines. En aéronautique, le contrôle de fissures débouchantes est assuré par la méthode du ressuage et ne permet pas un contrôle quantitatif des défauts. Dans le domaine médical où les pièces sont soudées, ou en fabrication additive, le contrôle, minutieux, est souvent réalisé par tomographie aux rayons X, une méthode lourde et longue, et délocalisé de la ligne de production... Le développement actuel de méthodes de thermographie infrarouge pour le contrôle volumique de ces pièces est suivi de près car offre de nombreux avantages : rapidité, sans contact et implémentable dans l'usine de fabrication [1]. En parallèle, depuis plusieurs années le laboratoire I2M s'est spécialisé dans la reconstruction de flux spatio-temporels, avec les travaux de A.Aouali [2] et T.Lafargue-Tallet [3] (déconvolution spatio-temporelle), et de sources volumiques avec les travaux de MM.Groz [4] (approche bayésienne). L'exploitation de ces travaux est à la base de la méthode de caractérisation développée. Après une excitation en surface, les défauts internes modifient la diffusion de la chaleur dans le matériau, ce qui se traduit par une variation du champ de température en surface en comparaison à une zone saine. De cette façon, les défauts peuvent être assimilés à des sources volumiques équivalentes de forme temporelle particulière. Une première partie cherche à valider cette observation. L'objectif est de la valider numériquement avec un code volumes finis simulant le contrôle d'une pièce avec des défauts sous-jacents. Dans un second temps, la méthodologie de reconstruction spatio-temporelle de sources est être exploitée pour remonter à ces sources équivalentes induites par les défauts. L'objectif est de mesurer la distribution des sources internes et ainsi de réaliser une tomographie 3D de l'échantillon. Expérimentalement l'objectif sera de tester cette méthode sur une pièce en aluminium contenant des fissures débouchantes de dimensions connues. La connaissance a priori des fissures débouchantes sera pris en compte dans la méthode d'inversion. [1] Garrido, I., Lagüela, S., Otero, R., & Arias, P. (2020). Thermographic methodologies used in infrastructure inspection : A review - Post-processing procedures. In *Applied Energy* (Vol. 266). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114857> [2] Aouali, A. (n.d.). Tomographie thermo-spectroscopique par imagerie 3D pour l'étude des torches à plasma. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03623084> [3] Lafargue-Tallet, T. (2023). Etude du comportement de matériaux illuminées par des sources lasers de fortes puissances. [4] Groz, M. M., Abisset-Chavanne, E., Meziane, A., Sommier, A., & Pradère, C. (2019). Three-dimensional reconstruction of thermal volumetric sources from surface temperature fields measured by infrared thermography. *Applied Sciences* (Switzerland), 9(24). <https://doi.org/10.3390/app9245464>

Défis et Innovations en Thermique des Semi- Conducteurs WBG : Modélisation Dynamique et Validations Expérimentales

Mohammed Riadh Berramdane^{1,2,*}

* ✉ : mohammed-riadh.berramdane@ifpen.fr

¹ IFP Energies nouvelles (France)

² Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Semi, conducteurs WBG, Simulation Eléments Finis, Modèle autorégressif à variables exogènes (ARX)

Résumé :

Dans le domaine de l'électronique de puissance, la gestion de la température des composants est un enjeu crucial, surtout avec l'émergence des composants à large bande interdite (WBG) qui fonctionnent à des fréquences de commutation élevées et avec des courants importants. Ces caractéristiques entraînent des pertes par commutation significatives et une augmentation de la température, ce qui soulève des défis majeurs pour leur contrôle. La température de jonction, un paramètre essentiel dans ce contexte, est difficile à mesurer directement. Compte tenu de la limite maximale de température fixée par les fabricants, il devient impératif d'estimer cette température de manière précise. Dans notre travail, nous avons observé que les modèles de réseaux thermique, tels que les modèles de Foster et de Cauer, sont fréquemment utilisés pour simuler le comportement dynamique des semi-conducteurs. Nous avons proposé une méthode basée sur une simulation FEM (Finite Element Method) en régime permanent (steady state). Cette approche nous a permis de définir les angles de diffusion et d'effectuer plusieurs étapes de traitement des données de température sur les différentes couches du semi-conducteur pour pouvoir modéliser notre modèle Cauer en calculant les résistances thermiques et capacités thermiques de chaque couche. Cependant, ces modèles présentent des limitations, notamment en ce qui concerne la modélisation FEM qui s'avère complexe, en raison des difficultés à obtenir des informations précises sur les propriétés physiques et thermiques des puces. Face à cette contrainte, nous avons exploré l'utilisation d'un modèle autorégressif à variables exogènes (ARX), que nous allons identifier en nous basant sur des mesures effectuées à partir d'un banc d'essai expérimental. Cette méthode offre une alternative viable à la simulation FEM, en raison de sa capacité à s'adapter aux données expérimentales réelles. Dans le cadre du présent travail, nous avons effectué une comparaison entre les résultats obtenus à partir de simulations 3D effectuées sur le logiciel COMSOL en régime dynamique et ceux générés par notre méthode proposée pour identifier le modèle de Cauer. Parallèlement, nous avons comparé ces résultats avec ceux obtenus à partir du modèle ARX, identifié grâce aux mesures issues de la simulation dynamique COMSOL. L'objectif était de déterminer quelle méthode reproduit le mieux le comportement dynamique des semi-conducteurs WBG. Pour compléter notre étude, nous avons réalisé un banc d'essai expérimental permettant d'identifier un modèle ARX pour la mesure de la température. Ce modèle a été développé en plaçant un capteur à proximité immédiate des puces (CTN), afin de recueillir des données de température en temps réel.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-052>

Imagerie en thermotransmittance : premières tentatives vers une super résolution

Florian Crouau^{1,*}, Stéphane Chevalier^{1,2}, Jérémie Maire¹, Jean-Luc Battaglia¹

* ✉ : florian.crouau@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France)

² Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM)

³ Bordeaux (France)

Mots clés : Thermotransmittance, Imagerie thermique, Traitement d'image

Résumé :

En imagerie, la résolution spatiale est limitée par le montage instrumental (échantillonnage ou diffraction). Plusieurs méthodes ont été développées pour dépasser ces limites, en particulier en microscopie à fluorescence. Ici, l'objectif est de mettre en place dans le cadre de l'imagerie thermique des techniques du traitement de l'image indispensables à toute implémentation de méthodes de super résolution. En particulier sont développées dans cet articles des considérations sur la déconvolution dans le cadre de mesures en thermotransmittance.

Mesure de température d'interface lors d'un soudage par résistance par point

Edouard Geslain^{1,*}, Thomas Pierre¹

* ✉ : edouard.geslain@univ-ubs.fr

¹ Institut de Recherche Dupuy de Lôme (France)

Mots clés : Température d'interface, Soudage par résistance par point, Méthode non intrusive, Résistances de contact électrique et thermique

Résumé :

Le soudage par résistance par point est le procédé le plus utilisé pour l'assemblage des véhicules automobiles. Il utilise l'effet Joule généré par un courant électrique de plusieurs milliers d'ampères pour porter deux ou trois tôles pincées entre deux électrodes en cuivre au-delà de leur température de fusion. Si le procédé est bien connu depuis des dizaines d'années [1], le développement de nouveaux matériaux pour l'allègement des véhicules (aciers, aluminiums, composites...) apporte de nouveaux problèmes opératoires. Pour étudier ces difficultés, la simulation numérique est utilisée pour prédire le développement d'une soudure plus rapidement et à moindre coût [2]. La durée du procédé est d'environ 300 ms. L'initiation de l'échauffement a lieu au niveau des interfaces tôle-tôle et électrode-tôle, là où les résistances de contact électrique et thermique prédominent par rapport aux résistances propres des tôles. L'épaisseur des interfaces étant de l'ordre de la dizaine de micromètre, l'échauffement interfacial est difficile à quantifier notamment avec des méthodes de mesures intrusives par thermocouple. Cette communication présente une méthode de mesure de la température aux interfaces. L'observation in situ par caméra infrarouge rapide est rendue possible en soudant en bord de tôles avec des demi-électrodes et avec des paramètres opératoires adaptés [2]. La caméra utilisée, de haute fréquence d'acquisition, est équipée d'un objectif permettant une résolution micrométrique de la scène, dont la température va de l'ambiance à la fusion des tôles. Une attention particulière est portée sur la difficulté d'étalonner la caméra, notamment à cause de l'effet de taille de source [3] très présent dans cette configuration rendant la mesure d'autant plus difficile. [1] E. Geslain, P. Rogeon, T. Pierre, C. Pouvreau, L. Cretteur, Coating effects on contact conditions in resistance spot weldability, *Journal of Materials Processing Technology*, 253, 160-167, 2018. [2] E. Geslain, P. Rogeon, T. Pierre, C. Pouvreau, L. Cretteur, Overheating induced by Al-Si coating during spot welding of a dissymmetrical three sheets assembly, *12th International Seminar on Numerical Analysis of Weldability*, Graz, 2018. [3] Bart, M., van der Ham, E. W. M., & Saunders, P. (2007). A new method to determine the size-of-source effect. *International Journal of Thermophysics*, 28, 2111-2117.

Contrôle Non Destructif Quantitatif d'une Résistance Thermique d'Interface de Faible Valeur par Mesure de Températures Bifaces

Christophe Rodiet^{1,*}

* ✉ : christophe.rodiet@univ-reims.fr

¹ Institut de Thermique, Mécanique, Matériaux (France)

Mots clés : Contrôle Non Destructif, Thermographie, Méthode de Monte Carlo

Résumé :

De nombreuses méthodes de CND existent, elles peuvent être de différentes natures d'excitation et de détection (optique, acoustique, mécanique, électromagnétique, ...). Dans le cadre des méthodes optiques, le Contrôle Non Destructif (CND) par Thermographie Infrarouge revêt une place croissante, d'une part grâce aux avancées technologiques (amélioration des performances des caméras IR, nouvelles techniques d'acquisitions et de traitements de données, ...) et d'autre part, car elle a l'avantage d'être sans contact, non intrusive, de mesurer un champ de flux ou de température, tout en étant rapide et simple de mise en œuvre. Le principe consiste généralement à exciter thermiquement le matériau à l'aide d'une source d'énergie optique (flash, laser, lampes halogènes, ...), et à mesurer la variation de température sur l'une des deux faces du matériau, ce qui permet, après traitement des images infrarouges, en analysant la modification de la diffusion thermique par rapport à un matériau (ou une zone du matériau) sain, de détecter qualitativement et de caractériser les potentiels défauts présents dans ce dernier. Ainsi, en couplant mesures expérimentales et modélisation du problème de conduction thermique à travers l'utilisation de méthodes inverses, il est possible de procéder au diagnostic quantitatif des défauts (détection et caractérisation). Cependant, le caractère mal posé du problème inverse (impliquant un mauvais conditionnement lors de l'inversion numérique) associé à de faibles « Rapports Signal sur Bruit » (RSB), peuvent rendre ce diagnostic difficile. De nombreuses méthodes de traitement avancé du signal et des données ont été développées dans le but de pallier ces problématiques : Thermographic Signal Reconstruction (TSR), Principal Component Thermography (PCT), Pulse Phase Thermography (PPT), High Order Statistics (HOS), méthode de contraste thermique temporel (DAC), ...), mais leurs performances sont généralement très fortement dépendantes du contexte expérimental (propriétés thermiques du matériau, défauts, type et régime d'excitation, ...). C'est donc dans ce contexte qu'est proposée une méthode de CND quantitatif basée sur la mesure de l'évolution spatiotemporelle des températures des faces avant et arrière d'un échantillon ayant été chauffé par une excitation Flash. Les objectifs sont de permettre de caractériser simultanément les propriétés thermiques des zones saines et des défauts, de façon précise et robuste. La présente étude se focalise sur la caractérisation de matériaux possédant des défauts internes de type délaminages, modélisable par des résistances thermiques. L'originalité de la méthode réside d'une part dans la modélisation du problème direct à l'aide de quadripôles thermiques (type « transmittance ») où les signaux de la face arrière sont exprimés de façon croisée en réponse aux signaux expérimentaux mesurés sur la face avant (avec et sans défaut) ; et d'autre part, sur la construction d'une fonctionnelle basée sur les températures duales pour la résolution du problème inverse. Les performances statistiques de la méthode sont étudiées à travers une méthode de Monte Carlo dans différentes configurations (matériaux, position et résistance thermique du défaut...). Ces résultats sont ensuite comparés à ceux issus d'une méthode utilisant le contraste thermique (procédure « monoface ») largement utilisée dans le CND de défauts.

Estimation du flux de chaleur extrait à la paroi par l'impact d'une goutte

Thomas Potaufoux^{1,*}, Ophélie Caballina¹, Guillaume Castanet¹

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

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Thermographie infrarouge, Impact de goutte

Résumé :

La pulvérisation par spray est une des méthodes les plus efficaces pour le refroidissement de surface. Cette méthode permet d'atteindre un refroidissement avec une densité de flux thermique pouvant atteindre 1000 W/cm^2 . Cependant, il n'est pas encore possible de prévoir les performances de sprays dues aux très nombreux paramètres qui régissent ses effets. L'étude de l'impact d'une goutte individuelle sur une surface chaude est ainsi un cas de recherche privilégié pour identifier les mécanismes physiques agissant sur le transfert de chaleur à la paroi. Dans cette étude, nous nous intéressons expérimentalement au cas d'une goutte impactant une paroi lisse. Afin de mettre en place une technique de thermographie infra-rouge, la paroi (en saphir), transparente dans l'infrarouge, est rendue émissive grâce à un dépôt de TiAlN de quelques micromètres d'épaisseur. Ce dépôt permet de relever le champ de température spatialement et temporellement grâce à une caméra IR haute cadence. Afin de pouvoir coupler les informations sur les transferts de la chaleur avec la dynamique d'impact de la goutte, une seconde caméra ultra-rapide permet d'observer par ombroscopie la goutte au cours de l'impact. L'estimation du flux de chaleur extrait à la paroi à partir des champs de température mesurés est un problème inverse de transfert thermique. Une résolution par quadripôle thermique permet de donner une expression analytique du flux thermique en fonction de la température. Dans les études menées précédemment dans l'équipe, les études se sont restreintes au régime d'ébullition à film où le film de vapeur présent entre la goutte et la paroi excluait tout contact mouillant et limitait les régimes dynamiques d'impact au rebond ou au splashing. Dans cette situation, une hypothèse d'axisymétrie du champ de température par rapport au point d'impact est pleinement justifiée et un profil radial moyen de température peut être estimé. Le flux de chaleur extrait peut alors être calculé sur ce profil de température en faisant usage des transformées de Hankel pour l'espace et de Laplace pour le temps [Chaze2019]. Les études menées actuellement concernent les plus basses températures impliquant des régimes d'ébullition nucléée. Etant donné le caractère aléatoire des sites de nucléation, l'hypothèse d'axisymétrie du champ de température n'est plus valide malgré le caractère circulaire initial de la goutte. C'est dans ce contexte qu'une nouvelle méthode se basant sur les séries de Fourier et les transformées en sinus a été développée afin d'utiliser directement les champs de température 3D dans la méthode d'obtention du flux de chaleur extrait à la paroi. De plus, un modèle prenant en compte l'émission radiative propre du saphir dans le flux reçu par la caméra infra-rouge a été mis en place pour corriger les lois de calibration et remonter proprement à l'émission propre du dépôt émissif et donc à la température de sa surface. Les améliorations obtenues par cette nouvelle méthode de traitement pourront être mises à profit pour l'étude de cas d'impact de gouttes d'eau en faisant varier la vitesse d'impact (Weber entre 30 et 120), la température de paroi dans une gamme de 80°C à 500°C et la mouillabilité de paroi.

[Chaze2019] : Chaze, W., Caballina, O., Castanet, G., Pierson, J. F., Lemoine, F., & Maillet, D. (2019). Heat flux reconstruction by inversion of experimental infrared temperature measurements—Application to the impact of a droplet in the film boiling regime. *IJHMT*, 128, 469.

Temporal Averaging Method for Improved NETD of High-Speed Infrared Cameras

Eric Guyot¹, Fabien Dupont^{1,*}, Joseph Carrock¹, Antoine Dumont¹, Benjamin Saute¹

* ✉ : fabien.dupont@telops.com

¹ Telops (Canada)

Mots clés : thermal camera, high, speed imaging, noise equivalent temperature difference, time averaging

Résumé :

With an ultimate goal of characterizing potential methods to improve Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) within cooled infrared imaging systems, this report describes the results of an improved acquisition method to minimize temporal noise contributions through averaging in post processing. Initial results indicate that with sufficiently static scenes and high framerates, temporal resolution can be traded for improved NETD performance without requiring adjustments to exposure time or pixel well filling levels. We report on our continued efforts to characterize this methodology with the hope that it may be widely beneficial to varied applications throughout the infrared thermography community.

Caractérisation des transferts de masse au sein des membranes polymères d'électrolyseurs microfluidiques par spectroscopie infrarouge.

Kevin Krause¹, Jean-Luc Battaglia^{1,*}, Stéphane Chevalier^{1,2}

* ✉ : jean-luc.battaglia@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France)

² Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM)

³ Bordeaux (France)

Mots clés : Imagerie, Infrarouge, hydrogène, électrolyseurs, spectroscopie

Résumé :

Les électrolyseurs à membrane polymère (PEM en anglais) constituent un système intéressant de stockage d'énergie renouvelable grâce à la production d'hydrogène de haute pureté à partir de l'électrolyse de l'eau. La PEM en particulier est un composant clé qui agit comme un électrolyte solide entre les électrodes et sépare les réactifs. Malgré ces avantages, ses mécanismes internes de transport d'ions ne sont pas entièrement compris. Ici, le premier électrolyseur PEM microfluidique transparent dans le spectre infrarouge (IR) est développé comme plateforme pour caractériser l'hydratation du PEM pendant son fonctionnement via une technique d'imagerie spectroscopique [1,2]. Dans ces travaux, une nouvelle puce microfluidique d'électrolyse de l'eau intégrant une membrane a été développée pour être caractérisée par spectroscopie infrarouge (IR). L'électrolyseur microfluidique a ensuite été caractérisé par une combinaison de techniques électrochimiques (EIS et DRT) et d'imagerie pour distinguer les contributions des pertes ohmiques, cinétiques et de transport de masse pendant son fonctionnement. Puis, la teneur en eau de la membrane est directement sondée in situ en mesurant l'intensité de la lumière transmise au travers celle-ci à des longueurs d'onde d'environ 4 μm . Dans cette communication, la métrologie de mesure d'imagerie IR, la fabrication d'un électrolyseur transparent dans cette gamme de longueur d'onde ainsi que l'analyse du transfert de masse seront présentées. Les analyses EIS et DRT ont révélé que des concentrations plus élevées en ions H^+ dans l'anolyte s'accompagnaient de pertes ohmiques réduites mais de pertes cinétiques et de transport de masse plus élevées. Ces effets du transfert de masse dans la membrane seront présentés plus en détail par le biais de la mesure de l'hydratation de la PEM dans trois régions caractéristiques où les canaux adjacents étaient soit humides, soit secs, soit un mélange des deux. On montrera que l'humidité locale des canaux affectait fortement l'hydratation de la PEM par l'apparition de gradients d'humidité entre les canaux de la cathode et de l'anode. [1] K. Krause, M. Garcia, D. Michau, G. Clisson, B. Billingham, J. Battaglia, S. Chevalier, Probing membrane hydration in microfluidic polymer electrolyte membrane electrolyzers via operando synchrotron Fourier-transform infrared spectroscopy, *Lab Chip*. 23 (2023) 4002–4009. [2] S. Chevalier, J.-N. Tourvieille, A. Sommier, J.-C. Batsale, B. Beccard, C. Pradère, Thermal Camera-Based Fourier Transform Infrared Thermospectroscopic Imager, *Appl. Spectrosc.* 75 (2021) 462–474.

Mesure sans contact de champs de température dans les milieux semi-transparents par thermotransmittance infrarouge

Abel Netter^{1,*}, Jérémie Maire¹, Stéphane Chevalier²

* ✉ : abel.netter@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France)

² Arts et Metiers Institute of Technology (France)

Mots clés : Thermotransmittance, Laser, Infrarouge, Caméra infrarouge

Résumé :

La mesure de température par thermotransmittance repose sur l'étude de la dépendance en température des propriétés optiques des matériaux, et plus particulièrement sur les variations de leur transmittance en fonction de la température. Bien que cette technique permette de s'affranchir des problèmes de caractérisation d'émissivité lors de la mesure de température par caméra infrarouge, la principale difficulté rencontrée dans la mise en œuvre de cette méthode est la difficulté à détecter un signal de thermotransmittance. Il est généralement 100 à 1000 fois inférieur au bruit de mesure et au rayonnement infrarouge provenant de l'échantillon (émission propre). Une première réponse à cette problématique avait été apportée durant la thèse de Coline Bourges [1], mais avec certaines limitations en termes de sensibilité et de temps de mesure. Ce nouveau travail montre la diminution des temps de mesure grâce entre autres à l'augmentation de la densité de puissance de nos sources thermiques. Pour cela, nous avons augmenté le rapport signal à bruit en développant un système à deux sources : une source optique et une source thermique permettant le chauffage volumique du milieu. Les deux sources sont modulées en intensité et couplées à une détection synchrone numérique sur les images collectées par la caméra. Nous avons choisi comme source thermique un laser infrarouge à une longueur d'onde principalement absorbée par l'échantillon (3.8 μm). Cette source fournit un chauffage sans contact et périodique de l'échantillon. La source optique est un corps noir modulé à une fréquence entre 1 et 2 Hz. Un traitement d'image basé sur une double démodulation dans les espaces de Fourier est effectué afin d'obtenir le module du champ de température moyen dans le matériau. Dans cette communication, nous présenterons des champs de température mesurés dans une lame de verre (Borofloat) qui atteignent une résolution thermique proche de 100 mK avec des fréquences laser allant jusqu'à 500 mHz, pour un rapport signal à bruit de l'ordre de 60 dB avec une élévation de température de 3.5K (soit proche des performances de la thermographie IR classique). Enfin, une discussion sur les limitations actuelles de cette méthode de mesure sera développée ainsi que les perspectives pour accélérer le processus de mesure afin d'aller vers de la tomographie thermique par thermotransmittance. Référence : [1] Coline Bourges. Thermography in semitransparent media based on mid-infrared thermotransmittance. Mechanics [physics]. Université de Bordeaux, 2023. English. ffNNT : 2023BORD0206ff. fftel-04228284

Thème 5

Thermique appliquée

Caractérisation du biotope dû à la condensation dans un échangeur air-sol (EAHE) pour analyser le risque sanitaire	97
Modélisation numérique et caractérisation des transferts thermo-hydriques lors de la cuisson de gâteaux	98
Corrélations technico-économiques pour la modélisation d'un système de trigénération pour bâtiments. Application sur le campus de l'Université Paris Nanterre	99
Redéfinir le calcul des apports et des déperditions du bâtiment dans une vision maquette numérique.100	
Evaluation de l'intensification du transfert de chaleur dans une unité de stockage thermique latent par l'utilisation d'une géométrie d'échange de type multitube et calandre aileté	101
Analyse de l'impact thermique dans les sols lors du passage d'un feu de végétation : Application à la sécurisation des zones de vestiges de guerre	102
Influence d'une source interne sur la température de Leidenfrost – application à un écoulement de type DFFB	103
Energy and exergy analysis of building envelope with different sustainable insulation materials . . .	104
Etude par simulation thermique dynamique de l'intégration d'une installation de panneaux aérovoltaiques sur une maison dite passive.	105
Comportement thermique des murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi	106
Etude expérimentale de l'échauffement de câbles électriques en fonction de la configuration d'installation	107
Bâtiments NZEB : Etat des lieux et applicabilité à un bâtiment de bureaux dans le contexte tropical chaud du Burkina Faso	108
Mesure de la conductivité thermique de matériaux isolants bio/géosourcés humides	109
Heat transfer analysis of using an electric resistant paint on road de-icing	110
Prédiction des performances thermo-hydrauliques de mini-canaux ondulés obtenus par fabrication additive	111
Thermal measurement campaign in three streets of Strasbourg to study interactions between trees and facades	112
Caractérisation thermique dynamique des enveloppes de bâtiments en temps réel : Une approche par décomposition en mode dynamique	113
Experimental comparison of a geothermal rainwater tank and other ground-coupled heat exchanger technologies for passive cooling	114
Redéfinir le calcul des apports et des déperditions du bâtiment dans une vision maquette thermique	115
Etude théorique et numérique de batteries de Carnot novatrices	116
Caractérisation d'une double peau vitrée placée sur l'enveloppe des bâtiments anciens pour réduire leur consommation énergétique	117
Système de Refroidissement Passif : Utilisation de la fraîcheur souterraine pour un confort thermique optimal pendant les saisons chaudes	118

Etude de l'ébullition dans un milieu poreux pour une application de type caloduc	119
Optimisation de l'isolation thermique d'un géopolymère à base de métakaolin renforcé par des fibres de miscanthus	120
Modeling of urban heat island effect on thermal comfort in urban open spaces, case study : ESTP Cachan campus	121
Evaluation de la conductivité thermique de composites à base de fibres de <i>Furcraea foetida</i> et de plâtre	122
Etude préliminaire de la caractérisation des performances thermo-hydrauliques de nouveaux fluides caloporteurs	123
Analyses expérimentales et numériques des émissions polluantes gazeuses et particulaires issues de la combustion biomasse	124

Caractérisation du biotope dû à la condensation dans un échangeur air-sol (EAHE) pour analyser le risque sanitaire

Geoffroy Chardome^{1,*}, Véronique Feldheim¹

* ✉ : geoffroy.chardome@umons.ac.be

¹ Université de Mons (Belgique)

Mots clés : Echangeur air, sol (EAHE), Condensation, Transferts de chaleur et de masse, Risque sanitaire

Résumé :

L'usage d'un échangeur air-sol (EAHE) ou puits canadien couplé à un système de ventilation mécanique permet d'amortir et de déphaser la variation périodique de la température extérieure. Cela permet de préchauffer l'air de ventilation en période hivernale et de le rafraîchir en période estivale, entraînant des économies d'énergie. Cependant, durant certaines périodes, des condensats vont apparaître dans le puits, s'écouler dans celui-ci et s'accumuler en fin de puits. Ces condensats vont former un biotope propice au développement de micro-organismes dont certains sont pathogènes et peuvent contaminer l'air de ventilation. L'étude proposée a donc pour objectif de caractériser en volume et température sur une période de deux ans (année sèche et année humide) le biotope présent en fin de puits à l'aide de modélisations numériques. Ces conditions sont ensuite comparées aux conditions de développement des micro-organismes pathogènes identifiés dans les condensats. Pour atteindre cet objectif, différents modèles numériques ont été établis. Premièrement la partie horizontale du puits dans laquelle a lieu l'essentiel des transferts de chaleur et de masse, ainsi que la modélisation de l'écoulement des condensats dans cette partie du puits. Deuxièmement la géométrie particulière de la fin du puits où s'accumulent les condensats et où auront également lieu des transferts de chaleur et de masse. L'écoulement de l'air à l'interface des condensats varie en fonction de la quantité de condensats présents en fin de puits. Les transferts de chaleur convectifs peuvent donc être de types forcés, naturels ou mixtes et faire également varier les transferts de masse. Les modélisations numériques ont pu être validées à l'aide de relevés expérimentaux réalisés sur une installation témoin. Celle-ci est constituée de deux tuyaux enterrés à une profondeur allant de 1,25 m à l'entrée à 2 m à la sortie sur une longueur de 25 m. La pente de 3 % permet l'évacuation des condensats et les concentre dans un volume à base cylindrique. L'analyse des micro-organismes a eu lieu sur différentes stations (air extérieur, condensat, sortie de puits, air intérieur). Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une extraction d'ADN, d'un séquençage et d'un traitement bio-informatique pour identifier les micro-organismes (bactéries et fungi). Les espèces bactériennes et fongiques identifiées ont été comparées aux bases de données FAPROTAX et FUNGUILD pour identifier les pathogènes et ce sont les normes allemandes TRBA 460 et 466 qui ont permis le classement des micro-organismes pathogènes en fonction de leur niveau de risques pour l'homme.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-001>

Modélisation numérique et caractérisation des transferts thermo-hydriques lors de la cuisson de gâteaux

Patrick El Helou^{1,*}, Pascal Le Bideau¹, Adrien Fuentes¹, Patrick Glouannec¹

* ✉ : Patrick.el-helou@univ-ubs.fr

¹ Université de Bretagne Sud (France)

Mots clés : Modèle numérique multiphysique, Transfert thermo, hydrique, Milieu poreux

Résumé :

Cet article traite le développement d'un modèle numérique multiphysique pour étudier les phénomènes de transfert de chaleur et de masse ainsi que le gonflement lors de la cuisson d'un gâteau contenu dans un moule. L'objectif de cette étude est de fournir un outil numérique efficace, validé expérimentalement, pour une meilleure compréhension des mécanismes conduisant au produit final désiré. Dans cette approche, le milieu est supposé être poreux déformable contenant trois phases : solide (pâte), liquide (eau) et gaz. La phase gazeuse comprend deux espèces, l'eau et le dioxyde de carbone (libéré par l'agent de levage). En se basant sur des équations régissant le transport de chaleur et de masse et sous quelques hypothèses (milieu homogène, équilibre thermodynamique local, phase gazeuse supposée être un mélange de gaz parfaits...), le problème consiste à résoudre un système de cinq équations aux dérivées partielles couplées. Les variables d'état sont la température, la teneur en eau, la pression totale des gaz, la porosité et le déplacement. Le gonflement de la pâte causé par l'augmentation de la pression totale du gaz est prédit par un modèle viscoélastique. Parallèlement à l'approche numérique, des essais expérimentaux sont réalisés sur un four pilote au sein du laboratoire. Dans ce contexte, un dispositif expérimental a été développé afin d'acquérir en continu les températures, les pertes en eau et d'appréhender correctement les conditions aux limites. La déformation du gâteau est également suivie par une caméra. Les résultats numériques sont comparés aux données expérimentales et analysés. Différentes conditions de fonctionnement sont testées pour vérifier la robustesse des prédictions.

Corrélations technico-économiques pour la modélisation d'un système de trigénération pour bâtiments. Application sur le campus de l'Université Paris Nanterre

Arthur Dupuy^{1,*}, Lavinia Grosu¹, Khanh-Hung Tran¹, Sirine Saidi¹

* ✉ : arthur.dupuy@parisnanterre.fr

¹ Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme (France)

Mots clés : Corrélations technico, économiques, Simulation Thermique Dynamique(STD), Analyse thermo, économique

Résumé :

Deux défis majeurs sont à relever dans le secteur énergétique : (i) fournir une puissance plus élevée à une population mondiale croissante et (ii) identifier les sources fortement émettrices de gaz à effet de serre pour assurer une transition vers celles plus respectueuses de l'environnement. Pour relever ces deux défis, deux approches se combinent : produire une énergie verte au travers des énergies renouvelables et, consommer moins d'énergie pour fournir les mêmes services, en améliorant l'efficacité des procédés [1]. Le développement de machines de trigénération peut apporter une solution dans le secteur du bâtiment. L'optimisation de ces systèmes se fait en premier lieu par l'usage de sources renouvelables, comme la géothermie ou l'énergie solaire, et l'amélioration des rendements énergétique et exergetique [2]. L'objectif de ce travail concerne le développement de corrélations technico-économiques afin de compléter le modèle énergétique, exergetique et économique d'un système de trigénération, pour une application dans le secteur des bâtiments, plus particulièrement sur le campus de l'Université Paris Nanterre [3]. Le système de trigénération étudié est en phase de dimensionnement, qui fait suite à la Simulation Thermique Dynamique (STD) du bâtiment (COMFIE). Plusieurs configurations sont analysées, en utilisant plusieurs sources énergétiques (solaire, géothermique, puits canadien et combustion de biogaz). Le stockage thermodynamique est proposé par Batterie de Carnot et la mutualisation des échangeurs des machines ORC (Organic Rankine Cycle) et PAC (Pompe A Chaleur) [4]. Une machine à absorption (LiBr/eau) va assurer le rafraîchissement solaire des locaux en utilisant des panneaux solaires thermiques et le stockage thermodynamique. L'analyse thermodynamique sera complétée par une analyse thermo-économique, dans le but de minimiser le coût total du système [5]. Afin de permettre cette optimisation, il est donc nécessaire d'établir des corrélations reliant le coût et les performances de chaque composant (compresseur, pompe, turbine, évaporateur, condenseur, bouilleur, absorbeur etc). L'étude bibliographique montre qu'il est nécessaire d'actualiser et de compléter les corrélations publiées dans la littérature scientifique [2,6], pour une adaptation aux gammes de composants et aux conditions de fonctionnement visées par notre application. [1] Ministère de la Transition Ecologique, 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/renovation-energetique> [2] Beniasadi E et al., Exergy-economic analysis of a solar-geothermal combined cooling, heating, power and water generation system for a zero-energy building, International Journal of Hydrogen Energy, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.186> [3] Grosu, L., Marin, A., Dobrovicescu, A., Queiros-Condé, D., Exergetic approach for a solar combined system : Organic Rankine Cycle and absorption cooling system, Int J Energy and Environmental Engineering (2016) 7(4) : 449-459. doi :10.1007/s40095-015-0168-y [4] Olivier Dumont, Guido Francesco Frate, Aditya Pillai, Steven Lecompte, Michel De paepe, Vincent Lemort, Carnot battery technology : A state-of-the-art review, Journal of Energy Storage, Volume 32, 2020 [5] Tsatsaronis G., Moran MJ. Exergy aided cost minimization, Energy Conversion and Management, 1997 ;38 :1535-42 [6] Grosu, L., Benelmir, R., FEIDT, M. Technico-economic simulation and optimization of a compression refrigerating machine, Energy Conversion & Management Journal 1999, 40(15) : 1651-1660,

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-019>

Redéfinir le calcul des apports et des déperditions du bâtiment dans une vision maquette numérique.

Lise Slama^{1,*}, Benjamin Cabrit¹, Pierre-Olivier Gustave¹, Sylvain Prévost¹, Nicolas Zalachas¹, Bruno Slama¹

* ✉ : l.slama@bbs-slama.com

¹ BBS SLAMA (France)

Mots clés : modélisation thermique du bâtiment, maquette thermique, ventilation

Résumé :

Il s'agit de présenter une méthode qui fait le lien entre toutes les connaissances passées sur les calculs thermiques et la vision actuelle du bâtiment. Pendant longtemps les méthodes thermiques pour le calcul des apports et déperditions ont consisté à utiliser des coefficients de réduction relatif b pour les locaux non chauffés et non climatisés. Toutefois ce type de méthode pour simplifier les calculs est peu précise, notamment lorsque les apports solaires ont un impact. Or avec la puissance des ordinateurs et avec la précision des maquettes numériques, il est devenu possible de calculer les températures et l'hygrométrie dans tous les locaux d'un bâtiment, aussi bien l'été que l'hiver. Cette méthode permet également de tenir compte de la ventilation, que ce soit pour une ventilation simple : ouverture de fenêtre, simple flux mécanique ou une ventilation plus complexe : double flux, centrale à débit d'air constant (DAC) ou centrale à débit d'air variable (DAV). Le calcul général pour le bâtiment en devient plus juste.

Evaluation de l'intensification du transfert de chaleur dans une unité de stockage thermique latent par l'utilisation d'une géométrie d'échange de type multitube et calandre aileté

Soumaya Sokakini^{1,*}, Jules Voguelin Simo Tala¹, Lionel Nadau², Adrian Ilinca³, Daniel Bougeard¹

* ✉ : soumaya.sokakini@imt-nord-europe.fr

¹ IMT Nord Europe, Institut Mines - Télécom, Univ. Lille, CERI Energie et Environnement F-59000, Lille (France)

² ENGIE Lab CRIGEN, 4 rue Joséphine Baker, 93240 Stains, France (France)

³ Département de Génie mécanique, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, 1100 Notre-Dame St W, Montréal, QC H3C 1K3, Canada (Canada)

Mots clés : Matériaux à Changement de Phase, Stockage thermique latent, Géométrie multitube et calandre ailetée

Résumé :

Le stockage thermique latent est un procédé de stockage prometteur qui a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années en raison de sa densité énergétique élevée. Cependant, il se heurte à un problème majeur, celui de la faible conductivité thermique des matériaux utilisés pour ce type de stockage, à savoir les Matériaux à Changement de Phase (MCP), avec pour conséquence une limitation des échanges de la chaleur à l'intérieur de l'unité de stockage. Parmi les techniques utilisées pour surmonter ce problème figure l'intensification du transfert de chaleur par extension de surface. Dans cette optique, la présente étude numérique propose une nouvelle configuration d'échangeur de chaleur de type tube et calandre, dénommée unité de stockage multitube et calandre aileté. Cette unité de stockage est destinée à la récupération et la valorisation de la chaleur fatale industrielle à basse et moyenne température. Elle consiste en quatre tubes caloporteur reliés entre eux par des ailettes longitudinales ainsi qu'à la calandre. Pour évaluer ses performances pendant les phases de fusion et de solidification, elle a été comparée à iso-volume du MCP avec un échangeur multitube, constitué de 4 tubes nus (sans ailettes), qui sert de géométrie de référence. Le MCP considéré dans cette étude est l'érythritol contenu dans la calandre, et l'huile thermique Hytherm 600 qui circule dans les tubes est utilisée comme fluide caloporteur. L'étude est menée avec le code de calcul Star CCM+ en employant l'approche enthalpie-porosité pour la modélisation du changement de phase. Après une phase de validation de notre approche avec des résultats numériques de la littérature et une analyse de l'indépendance au maillage et pas de temps, les résultats sont analysés tant au niveau local que global pour déterminer précisément les performances et l'intensification des échanges apportée par la géométrie avec extension de surface. Les résultats montrent que la configuration multitube à ailettes améliore le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le MCP par rapport au multitube nu, se traduisant par une réduction du temps de fusion de 27,4 % et du temps de solidification de 31,5 %. Cette étude montre également que les effets tridimensionnels liés au gradient axial de température dans les tubes caloporteur ont une influence non négligeable sur les processus de fusion-solidification.

Analyse de l'impact thermique dans les sols lors du passage d'un feu de végétation : Application à la sécurisation des zones de vestiges de guerre

Anthony Collin^{1,*}, Lucas Terrei¹, Franck Janiaut², Quentin Delacour²

* ✉ : anthony.collin@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

² Préfecture de la Meuse (France)

Mots clés : Feu de végétation, Interfaces forêt habitat, Impact thermique

Résumé :

Chaque année, les feux de végétation sont un risque majeur pour un grand nombre de pays sur la planète, aussi bien parce que ce phénomène tend à se développer dans des zones géographiques qui n'étaient pas encore impactées il y a de cela une dizaine d'années, mais aussi parce que l'occurrence des « grands feux » (plusieurs dizaines de milliers d'hectares brûlés) s'accélère. Malheureusement, les coûts de ces sinistres sont de plus en plus conséquents pour nos sociétés d'un point de vue humain, écologique et économique. L'intensification de ces incendies entraîne la propagation des feux aux zones péri-urbaines et fait apparaître de nouvelles problématiques qui sont celles de la vulnérabilité des interfaces forêt / habitat. Ces espaces sont sensibles car le risque incendie est préoccupant en raison d'une augmentation des sources d'inflammation (déprise agricole, expansion urbaine et sécheresse répétée) et de la vulnérabilité des infrastructures. A titre d'exemple, le feu de « Paradise » en Californie en 2018 a détruit 19 000 structures bâtementaires. En France, l'incendie le plus critique pour les interfaces forêt / habitat est celui de Gonfaron (Var) en 2021, où 50 bâtiments ont été détruits. Si ces structures sont vulnérables, alors elles n'offrent plus de refuges protecteurs pour la population et l'évacuation des zones impactées par l'incendie devient une obligation. Dans ce cadre sécuritaire, des nombreuses études sont en cours pour redéfinir les obligations réglementaires pour les habitations qui se trouvent dans ces zones sensibles. Il en va de même pour la sécurisation des réseaux aériens, comme les réseaux électriques et de télécommunications. Une solution technique consiste à enfouir les réseaux électriques, comme le réseau d'eau. Cependant, lors d'un violent feu de végétation, ces réseaux peuvent être également impactés, si les conditions thermiques sont extrêmes, par une onde de chaleur qui se propage dans le sol et peut mettre en péril la continuité des services. Une autre problématique similaire apparaît notamment dans le département de la Meuse, dans des zones répertoriées comme « vestiges de guerre » où de nombreuses ogives, munitions et obus sont encore présents à quelques dizaines de centimètres dans le sol. Le problème se pose alors de la défense contre l'incendie de ces massifs en cas de feux de forêts. En effet, en cas d'incendie, l'impact du feu sur le sol pourrait produire un déclenchement intempestif de ces munitions, et constituer un risque supplémentaire pour les sapeurs-pompiers engagés. La présente étude propose de comprendre et d'étudier l'impact thermique d'un feu de végétation (en surface) sur le sol et le sous-sol afin d'analyser le risque de dépassement de seuils sécuritaires inhérents à la résilience des réseaux (télécommunication ou hydraulique) et à la préservation des munitions enfouies. L'originalité de ces travaux repose sur le couplage des approches analytiques / numériques à des données expérimentales afin de consolider les hypothèses faites dans le cadre de cette étude (densité de flux en surface en fonction du temps) et de valider les prédictions des thermogrammes obtenus en sous-sol. Les résultats produits permettront d'identifier les profondeurs de sol qui sont impactées par l'onde thermique en fonction des conditions thermiques en surface.

Influence d'une source interne sur la température de Leidenfrost – application à un écoulement de type DFFB

Juan Esteban Luna Valencia^{1,*}, Arthur V.S Oliveira², Tony Glantz¹, Alexandre Labergue³, Michel Gradeck³

* ✉ : juan-esteban.luna@irsn.fr

¹ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (France)

² Université de São Paulo (Brésil)

³ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Ecoulement DFFB, Refroidissement du réacteur, Température de Leidenfrost

Résumé :

Lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP), le cœur du réacteur perd son inventaire en eau et malgré l'arrêt automatique du réacteur par chute des barres de contrôle (qui provoque l'arrêt de la réaction en chaîne), la température des assemblages va augmenter rapidement du fait de la puissance résiduelle produite par le cœur ; cette puissance est due à la désintégration des produits de fission. Cette source thermique représente environ 7 % de la puissance nominale du réacteur et elle décroît de façon exponentielle. Ainsi, même à l'arrêt, l'existence de cette puissance résiduelle explique qu'il faille refroidir le réacteur et que la température des assemblages puisse augmenter très rapidement dans les premiers instants suivant l'arrêt car ils ne sont plus refroidis. Ce refroidissement va s'opérer par une injection d'eau « froide » par le bas des assemblages et il va donner lieu à un écoulement dispersé de vapeur d'eau et de gouttes (en anglais, dispersed film flow boiling ou DFFB) qui se propage dans tout l'assemblage assez rapidement car même si la vitesse de renoyage est faible, le débit de vapeur générée au front de trempe donnera lieu à des vitesses importantes de la vapeur et des gouttes entraînées. Par conséquent, cet écoulement joue un rôle primordial dans le refroidissement initial des crayons combustibles qui ne sont pas encore immergés dans l'eau. Dans cet article, on va s'intéresser à l'influence de la puissance résiduelle sur la température de remouillage de la paroi. En effet, les assemblages se refroidissant en aval de la zone de trempe, on va passer d'un écoulement de type DFFB sans mouillage de la paroi à un écoulement mouillant si la température de paroi passe en deçà du point de Leidenfrost. Des expériences ont montré que cette température est influencée par plusieurs paramètres dont la puissance résiduelle. C'est ce que nous allons montrer et analyser dans cet article.

Energy and exergy analysis of building envelope with different sustainable insulation materials

Qianwen Tan^{1,*}, Monica Siroux¹

* ✉ : qianwen.tan@insa-strasbourg.fr

¹ INSA Strasbourg, ICUBE Laboratory, University of Strasbourg (France)

Mots clés : Energy analysis, Exergy analysis, Sustainable insulation materials, Thermal comfort

Résumé :

Sustainable insulation materials have demonstrated potential for enhancing building energy efficiency while maintaining thermal comfort. Traditionally, the energy efficiency of buildings and the insulating effects of these materials on the building envelope have been evaluated through energy analysis, which mainly focuses on quantifying total energy consumption. However, the application of exergy analysis offers a more comprehensive evaluation of the building envelope's energy efficiency. Therefore, this study analyzes the energy and exergy performance of the building envelope with different sustainable insulation materials on the Winter period for 24-h using MATLAB. The results indicate that sustainable insulation materials significantly improve the energy efficiency of the building envelope. This study provides a more comprehensive insight into evaluating the energy efficiency of building envelopes, not only by measuring energy use but also by assessing the effectiveness and quality of the insulation.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-031>

Etude par simulation thermique dynamique de l'intégration d'une installation de panneaux aérovoltaiques sur une maison dite passive.

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

* ✉ : benoit.liemans@umons.ac.be

¹ Université de Mons - Faculté Polytechnique (Belgique)

² Centre for Energy and Environment (France)

Mots clés : Simulation thermique dynamique, Panneaux aérovoltaiques, Optimisation énergétique

Résumé :

Cette communication est réalisée dans le cadre d'un projet qui consiste à étudier, modéliser et monitorer 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 des résultats de nos études préalables, nous avons développé un module de notre panneau aéro-photovoltaïque dans TRNSYS. Grâce aux simulations thermiques dynamiques (STD), nous étudions les apports d'une installation aéro-photovoltaïque améliorée sur une habitation unifamiliale à faibles besoins en chauffage située dans l'est de la Belgique. Nous comparons les résultats obtenus, tant d'un point de vue de la consommation énergétique que de la production électrique, avec la situation reprenant une installation de panneaux solaires hybrides non améliorés. Nous présentons également une étude de sensibilité de ces mêmes consommation et production en fonction de la situation géographique, afin de déterminer les régions les plus propices à l'usage de ce type de technologie.

Comportement thermique des murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi

Giada Giuffrida¹, Laurent Ibos^{1,*}, Abderrahim Boudenne¹, Hamza Allam¹

* ✉ : laurent.ibos@iutsf.org

¹ CERTES (France)

Mots clés : Propriétés hygrothermiques, Terre crue, BTC, Résistance thermique, Boîte Chaude Gardée

Résumé :

La préoccupation croissante concernant l'impact environnemental de la construction contemporaine a mis l'accent sur la nécessité d'adopter de nouvelles technologies durables avec une énergie intrinsèque plus faible et une production de déchets minimisée, comme celles basées sur l'utilisation de matériaux en terre crue. Comprendre le comportement du matériau terre à différentes échelles est fondamental pour aspirer à son intégration et sa valorisation dans l'architecture de demain. Ce travail rapporte les résultats d'une caractérisation physique et thermique de blocs de terre comprimée (BTC) produits avec les terres issues du chantier du Grand Paris. De plus, ces résultats sont utilisés pour simuler le comportement des parois en BTC à l'aide du logiciel de simulation Delphin. Grâce à la simulation, il est possible d'estimer le comportement statique et dynamique des parois en BTC dans un climat de référence. Enfin, les résultats des simulations sont comparés avec des mesures faites sur parois en BTC grandeur nature. Cette paroi a été testée à l'intérieur d'une boîte chaude gardée dans laquelle ont été reproduites des conditions de température similaires à celles simulées. Finalement, la comparaison entre les deux ensembles de résultats, effectuée en termes de résistance thermique et de paramètres dynamiques (facteur d'atténuation et déphasage), est présentée.

Etude expérimentale de l'échauffement de câbles électriques en fonction de la configuration d'installation

Philippe Reulet^{1,*}, Morgane Veca¹

* ✉ : philippe.reulet@onera.fr

¹ Onera/DMPE, Université de Toulouse, 31055 Toulouse (France)

Mots clés : Câbles électriques, Couplage électromagnétique, thermique, Modélisation numérique

Résumé :

En vue de l'électrification progressive des avions pour des raisons de fiabilité des équipements électriques ainsi que environnementales, une augmentation conséquente du nombre de câbles déployés à bord des avions a été identifiée, aussi bien de signaux que de hautes tensions. Les contraintes de compatibilité électromagnétique (CEM) et thermiques liées à l'architecture électrique s'avèrent donc de plus en plus critiques. Une étude menée au sein des départements DEMR et DMPE de l'ONERA a montré l'intérêt de développer un modèle unifiant les deux physiques pour analyser les performances du câblage tant du point de vue fonctionnel que CEM. La modélisation numérique de l'échauffement des câblages nécessite la prise en compte du couplage électromagnétique-thermique, au travers de la dépendance de la résistance électrique des conducteurs avec la température. En se basant sur une description topologique du réseau électrique, le modèle couplé vise à résoudre le modèle électromagnétique permettant de déterminer les paramètres électriques primaires d'une ligne de transmission et de calculer les courants électriques dans les câbles, ainsi que le modèle thermique dédié au calcul de l'échauffement des câbles par effet Joule. L'objet de ces travaux est de déterminer l'influence d'un environnement proche des câbles sur leur capacité à se refroidir par convection naturelle. Par exemple, on comprendra aisément qu'un câble nu et un câble en fond de goulotte n'atteindront pas les mêmes températures, toutes choses égales par ailleurs. A partir des résultats expérimentaux, l'objectif est d'évaluer le coefficient d'échange thermique qui permet de calculer les pertes thermiques autour des câbles dans le cadre des modélisations numériques. Ce coefficient d'échange dépendra notamment de la disposition des câbles et de la présence éventuelle de goulottes. Les travaux expérimentaux présentés font suite à ceux de la thèse de Florian Mahiddini (2018) et se décomposent en deux parties. La première partie consiste à caractériser précisément la résistance électrique du câble aéronautique de puissance de gauge AWG 4, en fonction de sa température. Le banc de caractérisation et tous les moyens de mesure mis en œuvre sont décrits. Trois essais ont été réalisés et exploités. Une analyse d'incertitude est menée pour connaître la précision des paramètres identifiés. Dans un deuxième temps, l'échauffement de ce câble est étudié pour différentes configurations d'installation : câble seul en espace libre, deux câbles torsadés en espace libre, quatre câbles fixés sur un plan de masse par des brackets. Les moyens expérimentaux mis en œuvre sont présentés : mesures des températures de surface du câble, température de l'air dans la cavité d'essais et alimentation électrique (courant, tension) pour connaître la puissance générée. Une campagne d'essais pour chaque configuration a été effectuée. Les mesures sont enregistrées en continu, pour différents paliers de courant électrique. Les grandeurs moyennes sont extraites pour chaque palier, en conditions stabilisées. Les résultats de ces mesures sont détaillés et analysés. Cela conduit à définir des corrélations pour le coefficient d'échange convectif pour les différentes configurations d'installation. Ces résultats sont comparés aux valeurs théoriques fournies par les normes de dimensionnement des câbles électriques. Enfin les corrélations obtenues pourront par la suite être intégrées au modèle thermique.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-049>

Bâtiments NZEB : Etat des lieux et applicabilité à un bâtiment de bureaux dans le contexte tropical chaud du Burkina Faso

Bazam Amonet Ouoba/nébié^{1,2,*}, Monica Siroux¹, Abdou Lawane Gana²

* ✉ : bazam.ouoba@etu.unistra.fr

¹ INSA Strasbourg, ICUBE, Université de Strasbourg, France (France)

² Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD)

Mots clés : Bâtiments NZEB (Nearly Zero Energy Building), Contexte tropical chaud, Burkina Faso, Bâtiment de bureaux

Résumé :

La présente étude dresse un état des lieux des recherches portant sur les bâtiments « nearly zero energy building » (NZEB) dans le contexte tropical ouest-africain et les différents paramètres d'applicabilité pour un bâtiment de bureaux type au Burkina Faso. Ainsi les différentes méthodes passives, actives sont explorées afin de déterminer les plus pertinentes applicables au contexte climatique du Burkina Faso. La collecte de données énergétiques effectuée dans un bâtiment de bureaux a permis d'avoir un aperçu de son état de consommation énergétique. Il ressort que la climatisation et l'enveloppe du bâtiment sont des paramètres qui influencent fortement cette consommation.

Mesure de la conductivité thermique de matériaux isolants bio/géosourcés humides

Machhour El Assaad¹, Yohan Plantec^{1,2}, Thibaut Colinart^{1,*}, Thibaut Lecompte¹

* ✉ : thibaut.colinart@univ-ubs.fr

¹ Institut de Recherche Dupuy de Lôme (France)

² Cellaouate (France)

Mots clés : Matériaux isolants, Transferts d'humidité, Equilibre hygrothermique

Résumé :

Connaître les évolutions de la conductivité thermique d'un matériau en fonction de la température et de la teneur en eau est utile pour affiner la prédiction des performances énergétiques des bâtiments ou le confort hygrothermique. Les mesures sur des matériaux humides par des méthodes en régime permanent s'accompagnent de transferts d'humidité du côté chaud vers le côté froid de l'échantillon et donc de transferts latents pouvant altérer la précision de la mesure. L'objectif de cette étude est d'examiner l'impact de ces transferts d'humidité dans divers matériaux isolants bio/géosourcé humides lors des mesures de conductivité thermique par une méthode fluxmétrique. Les matériaux testés sont le béton cellulaire, les bétons biosourcés, la ouate de cellulose et les isolants en fibre de bois. Les résultats sont examinés pour prédire la durée de l'essai conduisant à l'équilibre hygrothermique au sein de l'échantillon, pour évaluer la dépendance expérimentale de la conductivité thermique à l'humidité, pour quantifier les erreurs commises en cas d'interruption prématurée de l'essai et enfin pour tester une méthode permettant de réduire le nombre d'essai.

Heat transfer analysis of using an electric resistant paint on road de-icing

Pengfei Cao^{1,*}, Frédéric Filaine¹, Laurent Royon¹, Xiaofeng Guo¹

* ✉ : pengfei.cao@u-paris.fr

¹ Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain (France)

Mots clés : De, icing, Electric resistant paint, Thermal contact resistance, Temperature distribution

Résumé :

Icing on roads poses a serious threat to the transportation, infrastructure, and safety of users. This article introduces an innovative paint material with the ability to de-ice through electric resistance heating. Organized in a sandwich structure, comprising an upper asphalt layer, a paint layer consisting of 40 % carbon black and 60 % water, and a lower asphalt layer, the system is examined for its physical, thermal, and electrical properties. The effects of different electrical powers, thermal contact resistance, as well as the presence of holes or defects of varying sizes on the paint layer, and the ice fusion process on the upper asphalt, are investigated. A two-dimensional numerical model is developed using COMSOL Multiphysics to explore thermal effects under various electrical powers and simulate thermal contact resistance through a thin 0.35 mm air layer. Validation experiments are conducted with two granite pieces as asphalt and heating paint. In-depth research on the impact of a defect in the paint on the uniformity of temperature distribution on the surface of the upper asphalt is carried out using a three-dimensional numerical model. Three boundary conditions represent different situations : ideal paint without defects, paint with a relatively small defect, and paint with a relatively large defect. Experiments, including a 5 cm hole in the paint layer, are performed to validate the simulation. The analysis of ice fusion on the surface of the upper asphalt aims to optimize the results. Two-dimensional models and experiments indicate that a power of 450 W/m² is economically the most effective, and the thermal contact resistance can cause a delay of 0.5 hours to reach 0 °C at the surface of the upper granite at this power. However, using a thicker paint layer or asphalt to replace the thin air layer can mitigate its impact. Experimental and numerical results demonstrate that, in the presence of a relatively small defect, the new heating paint has the ability to homogenize the temperature distribution on the surface of the upper granite, with a maximum temperature difference of 1.5 °C under a constant power of 654 W/m².

Prédiction des performances thermo-hydrauliques de mini-canaux ondulés obtenus par fabrication additive

Nathan Richermoz¹, Damien Gloriod¹, Thierry Baffie¹, Pierre Coste¹, Zoé Minvielle^{1,*}

* ✉ : zoe.minvielle@cea.fr

¹ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France)

Mots clés : caractérisation thermohydraulique, minicanaux ondulés, fusion laser sur lit de poudre

Résumé :

Malgré l'intérêt croissant de la Fabrication Additive (FA) pour la réalisation de composants thermiques, ce procédé est encore récent et peu mature notamment concernant la maîtrise et le contrôle des topologies de surface. Des valeurs de rugosités relatives jusqu'à 38 % du diamètre hydraulique et de fortes déformations des sections de passage sont ainsi observées dans les mini-canaux [1]. Cela implique des difficultés de prédiction des performances thermo-hydrauliques à partir des dimensions théoriques (CAO). De nombreux travaux sur la modélisation de la rugosité existent mais dans le cas de la FA, les motifs de rugosité sont particuliers et nécessitent des approches différentes. Parmi elles, le modèle ESGR (Equivalent Sand Grain Roughness) semble prometteur [2]. Nos travaux concernent la caractérisation thermo-hydraulique expérimentale de milli-canaux ondulés obtenus par FA dont l'état de surface varie puis la validation de l'approche numérique retenue pour en prédire les performances. Plusieurs maquettes ont été réalisées (alliage 600) par FA (fusion laser sur lit de poudre) et CIC (Compaction Isostatique à Chaud) puis testées. Elles sont constituées d'un milli-canal (2mm de diamètre hydraulique) de rugosité variable. Les grandeurs géométriques des canaux ont été caractérisées par tomographie RX-3D (CT-scans) ce qui a permis de mettre en évidence une ovalisation de la section de passage théoriquement circulaire et des différences de rugosité et de défauts selon l'orientation de construction des parois du canal (plafond vs plancher). Un modèle RANS, $k-\omega$ SST (Ansys Fluent) est employé pour les calculs numériques. Pour modéliser la rugosité, la corrélation de Stimpson et al. [2] est utilisée afin de déterminer le paramètre ESGR à partir des mesures expérimentales de rugosité. Comme attendu le transfert thermique est meilleur dans les canaux obtenus par FA que dans les maquettes lisses (CIC) au détriment des pertes par frottement. Le nombre de Nusselt ainsi que le facteur de friction obtenus par calculs CFD sont comparés aux valeurs expérimentales. Les calculs CFD tiennent compte, dans leur géométrie, de la déformation des canaux et ; dans le modèle (Icing), de la rugosité. Ils permettent de prédire les performances thermo-hydrauliques avec une erreur de ± 10 %. La prédiction des déformations géométriques et des rugosités dans des composants obtenus par FA est, à notre connaissance, complexe. Les deux principales modifications proposées dans ce travail, à savoir la prise en compte des déformations géométriques et la modélisation de la rugosité à partir d'une mesure de rugosité moyenne, suffisent à prédire raisonnablement les performances thermo-hydrauliques d'un milli-canal ondulé, aucune des deux approches ne nécessitant de quelconques paramètres ajustables. Les travaux futurs s'orientent vers la prédiction des déformations et des rugosités à partir de la connaissance des paramètres d'impression lors du procédé de FA lui-même. [1] Wildgoose et al., J. Turbomach., vol. 143, no. 7, p. 071003, 2021. [2] Stimpson et al. J. Turbomach., vol. 139, no. 2, 2017, doi : 10.1115/1.4034555.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-076>

Thermal measurement campaign in three streets of Strasbourg to study interactions between trees and facades

Vincent Lecomte^{1,*}, Hélène Macher¹, Tania Landes¹, Françoise Nerry¹, Renato Cifuentes¹, Pierre Kastendeuch¹, Georges Najjar¹, Chaimaa Delasse^{1,2}

* ✉ : vincent.lecomte@insa-strasbourg.fr

¹ Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (France)

² Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (Maroc)

Mots clés : Urban Climatology, Thermal Comfort, Urban Microclimatic Modelling, Tree, Facade Interaction

Résumé :

The TIR4sTREEt project studies the urban climatology in Strasbourg, focusing on the behaviour of trees in the city and their role in improving urban thermal comfort during periods of extreme heat. To collect the necessary data for this analysis, a significant number of microclimatic and eco-physiological sensors have been installed for both climatic and tree data acquisitions, respectively. Among others, infrared thermography is used to study the surface temperatures of urban elements and to highlight the interaction between trees and nearby buildings. On the one hand, thermal infrared (TIR) cameras were installed on fixed masts in the study area to continuously monitor and record the temperature of the tree crowns over several weeks, in order to assess, for example, the impact of the tree shading on facades. Additional TIR acquisitions were made at ground level, during specific times of the day using a specifically designed mobile system. On the other hand, miniature temperature data loggers, known as thermo buttons, were placed on the facades at specific locations. Thermal measurements from these thermo buttons will be compared with temperatures extracted from thermal images. In future works, this comparison will allow the measurements to be verified in order to study the interaction between trees and facades. Furthermore, the whole dataset of thermal data will be used to validate the results generated by urban microclimatic modelling software.

Caractérisation thermique dynamique des enveloppes de bâtiments en temps réel : Une approche par décomposition en mode dynamique

Lahoucine Ouhsaine^{1,*}

* ✉ : lahoucine.ouhsaine@cyu.fr

¹ Laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil (France)

Mots clés : Caractérisation thermique dynamique, Enveloppes de bâtiments, Décomposition en mode dynamique

Résumé :

Dans cette étude, la méthode de décomposition en mode dynamique (DMD) a été appliquée afin de déterminer les propriétés thermo-physiques des enveloppes dans des conditions réelles et dynamiques, à partir des mesures de température et de flux. Notre approche repose principalement sur un modèle de transfert de chaleur développé pour les enveloppes, servant de base exploitable par la technique de la DMD. L'objectif principal de notre travail est de faciliter la caractérisation et de réduire le temps de calcul dans des contextes climatiques variables. Cette démarche implique l'utilisation d'un modèle simplifié sous forme de modèle boîte grise et adapté à la méthode DMD, pour identifier les paramètres thermiques du système. Permettant ainsi une caractérisation rapide et efficace des propriétés thermo-physiques des composants du bâtiment. Des conclusions théoriques ont été tirées de notre étude, mettant en évidence les limites d'application de la méthode DMD et encourageant la résolution des défis liés au diagnostic des bâtiments existants.

Experimental comparison of a geothermal rainwater tank and other ground-coupled heat exchanger technologies for passive cooling

Lucas Striegel^{1,*}, Edouard Walther¹, Jean-Baptiste Bouvenot¹, Hossein Nowamooz¹

* ✉ : lucas.striegel@insa-strasbourg.fr

¹ Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (France)

Mots clés : Geothermal rainwater tank, Passive cooling, Shallow geothermal energy

Résumé :

Geothermal rainwater tanks are new hybrid solutions for passive cooling of building and water resources management. They consist of a buried rainwater tank and an immersed coiled heat exchanger that harvest shallow geothermal energy. This communication presents the experimental study of a full-scale prototype of geothermal rainwater tank and exhibits promising result. Then a literature comparison with other passive technologies validates the system's viability in terms of performance.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-088>

Redéfinir le calcul des apports et des déperditions du bâtiment dans une vision maquette thermique

Nicolas Zalachas^{1,*}, Bruno Slama¹, Lise Slama¹, Pierre-Olivier Gustave¹, Benjamin Cabrit¹, Sylvain Prévost¹, Vincent Jammet¹, Stéphane Robin¹, Régis Maton¹

* ✉ : n.zalachas@bbs-slama.com

¹ BBS SLAMA (France)

Mots clés : Maquette thermique du bâtiment, Analyse de performances énergétiques, Déperditions thermiques

Résumé :

La nécessité de préserver la planète et en particulier de réduire les émissions de CO₂ demande de réduire les consommations d'énergie. L'évaluation fine du besoin en énergie d'un bâtiment, qui reste plus que jamais un objectif, se heurte pourtant à la complexité des lois de la physique. Pour être en mesure de mener les calculs, de fortes hypothèses simplificatrices ont été formulées et le cadre retenu pour réaliser le calcul a souvent été le local. Nous montrons comment cela a un fort impact sur la justesse des calculs, en particulier pour le calcul de ventilation, le calcul des espaces tampons et le calcul de l'hygrométrie en été. Nous montrerons ensuite comment une approche « maquette thermique » du bâtiment permet une forte amélioration de la précision des calculs de déperditions et d'apports. Nous verrons comment cette approche qui s'intègre dans l'approche BIM (Building Information Modeling) des bâtiments permet de calculer la part couverte par les systèmes de ventilation comme les DAC (Débits d'Air Constants) et les DAV (Débits d'Air Variables) et de connaître la part à fournir par chaque émission et chaque génération.

Etude théorique et numérique de batteries de Carnot novatrices

Benoît Payebien^{1,*}, Nicolas Tauveron¹, Nadia Caney¹

* ✉ : benoit.payebien@cea.fr

¹ CEA, LITEN, DTCH (France)

Mots clés : Stockage massif d'électricité, Batteries de Carnot, Optimisation multicritère, Modélisation analytique et théorique

Résumé :

Avec la pénétration des énergies renouvelables (ENR) toujours plus importante dans nos mix énergétiques et leur intermittence intrinsèque, nos capacités de stockage se doivent d'être considérablement augmentées pour atteindre les objectifs de décarbonation fixés par les politiques environnementales. Les batteries de Carnot (BC) sont une alternative crédible aux autres technologies de stockage massif d'électricité, grâce notamment à l'absence de contraintes géographiques lors de leur implantation et le fait qu'elles aient peu recours à des matériaux critiques. Les BC présentent de plus des rendements de conversion intéressants au regard de leurs faibles coûts d'investissement. Le principe de fonctionnement de cette technologie est donné en figure 1. Lorsque de l'électricité nécessite d'être stockée, elle est préalablement convertie en chaleur via un procédé de charge, stockée sous forme thermique, puis restituée en étant reconvertie via un cycle moteur. Une BC peut être qualifiée de batterie intégrée (BCI) si des flux thermiques additionnels et externes sont valorisés lors de son cycle comme illustré sur la figure 1. Dans ces travaux, un type de batterie particulier est étudié, il s'agit des batteries de Carnot greffées (BCG) dont le concept est présenté dans la figure 2. A une centrale thermique de production électrique est greffé un module de BC composé d'un procédé de charge et d'un stockage thermique. Une partie du flux thermique de la centrale est dévié pour être valorisé auprès du procédé de charge qui va permettre le stockage de chaleur à plus haute enthalpie que celle générée par la centrale. Ce gain d'enthalpie est assuré par l'électricité du réseau lors de la phase de charge de la BCG. Lors de la décharge de la BCG, le flux à plus haute enthalpie est valorisé par le cycle moteur qui est mutualisé entre la centrale et la BCG. L'architecture des BCG conduit notamment 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 étude analytique et théorique des BCG est proposée, à travers notamment de l'adoption d'une nouvelle définition pour le rendement de conversion à l'échelle système. Une étude d'architecture est également menée, visant à déterminer les configurations de BCG qui conduisent à des résultats prometteurs. Cette étude réalisée sous le logiciel Engineering Equations Solver (EES) consiste en une optimisation multicritère des trois sous-composants d'une BCG selon les architectures considérées. Les résultats des simulations de trois configurations seront présentés et discutés, l'une modélisant une BCG à un cycle organique de Rankine (ORC) transcritique avec un stockage chaud, ainsi que deux autres modélisant une BCG supercritique avec des stockages chaud et froid.

Caractérisation d'une double peau vitrée placée sur l'enveloppe des bâtiments anciens pour réduire leur consommation énergétique

Eric Delacourt^{1,2,*}, Insaf Mehrez², Julien Pellé², Philippe Lemoine¹, Bernard Piton¹

* ✉ : eric.delacourt@uphf.fr

¹ INSA Institut National des Sciences Appliquées Hauts-de-France (France)

² Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines - UMR 8201 (France)

Mots clés : Déperditions thermiques, enveloppe des bâtiments, Rénovation thermique

Résumé :

La rénovation thermique des maisons anciennes du Nord de la France et de l'Europe (passoires thermiques) est un défi majeur afin de réduire significativement les consommations énergétiques du secteur du bâtiment. Cet enjeu est renforcé par le besoin de limiter l'impact architectural des solutions de réhabilitation retenues. Cette étude, à la fois numérique et expérimentale, se concentre sur l'amélioration des performances thermiques en utilisant un simple vitrage comme une fine double peau en surimposition sur l'extérieure de l'enveloppe très inertielle des bâtiments en briques. Cette configuration « low-tech » offre une barrière au rayonnement IR du mur de briques mais possède d'autres intérêts comme la réduction du coefficient de convection externe, la création d'un espace tampon conductif, une barrière hydrique extérieure. Elle dispose en outre d'une transparence qui permet de conserver le visuel d'origine avec une faible emprise au sol et permet une réhabilitation sans déménagement des occupants. Les performances obtenues sont remarquables puisque dans les Hauts de France, avec un simple vitrage standard, la réduction des déperditions thermiques annuelles par rapport à un mur en brique seul atteint 65 % sur la façade sud et 49 % sur la façade nord.

Système de Refroidissement Passif : Utilisation de la fraîcheur souterraine pour un confort thermique optimal pendant les saisons chaudes

Marc Kamtcheu^{1,2,*}, Eric Delacourt², Matthieu Labat³, Monica Siroux¹

* ✉ : marcjosias.kamtcheudendjeu@uphf.fr

¹ INSA Strasbourg, ICUBE, Université de Strasbourg, France (France)

² INSA Hauts de France (France)

³ INSA Toulouse (France)

Mots clés : Refroidissement Passif, fraîcheur souterraine

Résumé :

Le secteur du bâtiment représente en moyenne 40 % de la consommation globale d'énergie et selon une enquête menée par l'Organisation des Nations unies pour l'environnement en 2020, les bâtiments représentent également près de 40 % des émissions mondiales de CO₂ chaque année. Le rafraîchissement et le chauffage contribueraient à 60 % de cette consommation d'énergie. Ce chiffre en constante augmentation risque de doubler voire tripler en 2050. Pour réduire cette consommation nous proposons une solution de rafraîchissement passif d'un bâtiment résidentiel garantissant un confort thermique pendant les périodes chaudes en France. Cette solution utilise une cuve enterrée et non-isolée remplie d'eau , qui va capter la fraîcheur du sol, la stocker et la restituer à travers un système de vectilo-convecteur qui va refouler de l'air frais à l'intérieur du bâtiment.

Etude de l'ébullition dans un milieu poreux pour une application de type caloduc

Mathilde Bois^{1,*}, Bénédicte Champel¹, Mathieu Mariotto¹, Michel Gradeck²

* ✉ : mathilde.bois@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes (France)

² LEMTA (France)

Mots clés : Evaporation, Ebullition, Milieu poreux

Résumé :

Le contrôle thermique des composants électroniques des satellites de télécommunication requiert des systèmes de refroidissement performants, peu encombrants et autonomes. Les caloducs sont des dispositifs passifs de transport de chaleur très efficaces dont le fonctionnement repose sur les changements de phase d'un fluide de travail dans une enceinte fermée entre une source chaude (évaporateur) et une source froide (condenseur). La miniaturisation et l'augmentation de la densité de puissance des composants électroniques constituent une véritable contrainte pour les technologies de caloduc de type profil d'aluminium extrudé à rainures réentrantes présents sur le marché. Ces densités de puissance élevées peuvent provoquer la formation de bulles de vapeur dans la phase liquide à l'évaporateur, ainsi que l'assèchement partiel ou complet de la paroi, entraînant a minima des surchauffes localisées et au pire des dysfonctionnements ou des dommages aux dispositifs thermiques. Dans ce contexte, l'une des contraintes opérationnelles des caloducs concerne la densité de flux à l'évaporateur, qui doit rester en dessous d'un seuil spécifique. Ce travail s'intéresse à l'intégration d'un moteur capillaire poreux au niveau de l'évaporateur d'un caloduc, dans le but de repousser cette limite de fonctionnement. Une configuration dite « à ménisque inversé » est rendue possible par l'utilisation d'une géométrie rectangulaire de l'évaporateur, contrairement aux caloducs à sections cylindriques classiquement rencontrés. Ce type d'évaporateur est inspiré des boucles diphasiques à pompage capillaire, qui se distinguent des caloducs par leur architecture. Ces dispositifs acceptent notamment des densités de flux élevées de l'ordre d'une ou plusieurs centaines de [1]. La configuration « ménisque inversé » doit ainsi permettre de repousser certaines limites de fonctionnement et présenter une meilleure conductance thermique d'évaporation en comparaison avec les caloducs « classiques ». Pour maximiser l'efficacité des évaporateurs en configuration à « ménisque inversé », une compréhension approfondie du phénomène d'évaporation dans le milieu poreux de l'évaporateur est requise. Dans le cas des caloducs à rainures axiales ou réentrantes, l'apparition initiale des bulles indique la limite d'ébullition. Ces premières bulles améliorent les échanges thermiques, jusqu'à ce que le régime de nucléation finisse par dégrader puis désamorcer le pompage capillaire et au pire assécher la paroi. La détermination de cette limite est extrêmement complexe car elle dépend de l'état de surface du caloduc, des propriétés du fluide et des interactions entre le fluide et la paroi. L'objectif des travaux est de comprendre et de caractériser les phénomènes physiques liés à l'évaporation et à l'ébullition dans les milieux poreux, en se concentrant sur la configuration d'évaporateur à "ménisque inversé" intégrable dans un caloduc. Ces travaux adopteront une approche expérimentale, impliquant la mise en place d'une section d'essais pour évaluer l'impact de divers paramètres tels que la géométrie de l'évaporateur et la taille des pores du milieu poreux. Ce banc d'essais permettra également d'assurer une visualisation des phénomènes physiques. De plus, une étude numérique (CFD diphasique) à l'échelle de l'évaporateur sera menée pour compléter cette analyse expérimentale. [1] Bertin, Y., Flavio, Filippo, Marc, Valérie, 2019. Panorama des systèmes diphasiques dédiés au refroidissement de l'électronique. Journée SFT

Optimisation de l'isolation thermique d'un géopolymère à base de métakaolin renforcé par des fibres de miscanthus

Nicolas Dujardin^{1,*}, Laurent Gautron², Assia Djerbi³, Thouraya Salem³, Hussein Nasereldine²

* ✉ : nicolas.dujardin@u-pec.fr

¹ CERTES laboratory (CERTES, Université Paris Est Créteil, 61 Av. du Général de Gaulle France)

² Laboratoire Géomatériaux et Environnement (France)

³ UMR Matériaux pour une construction durable (France)

Mots clés : Géopolymère, Métakaolin, Fibres de miscanthus, Propriétés thermiques, Caractérisation microstructurale

Résumé :

Cette étude répond à l'urgence croissante d'avoir des matériaux de construction durables. Elle présente une approche novatrice en utilisant des fibres de miscanthus (MF) dans une matrice géopolymère à base de métakaolin pour l'isolation thermique. En analysant différents types de métakaolin, de solutions alcalines et de méthodes de durcissement, l'étude évalue divers aspects tels que la maniabilité, la densité, la résistance à la compression, les propriétés thermiques, la porosité et la microstructure. L'incorporation de 30 % de MF en poids réduit la résistance à la compression de 19,38 MPa à 6,43 MPa après 28 jours, tandis que la porosité passe de 37 % à 52 %. Cette augmentation de porosité, notamment dans les pores > 10 µm, diminue la conductivité thermique, un aspect crucial pour l'isolation. La matrice géopolymère sans MF sert de référence avec une conductivité thermique de 0,45 W m⁻¹ K⁻¹. Une formulation contenant 50 % de MF en poids atteint la plus faible conductivité thermique (0,21 W m⁻¹ K⁻¹) et une résistance à la compression de 5 MPa. Conforme aux normes de plâtrage, d'enduit et de mortier de maçonnerie, l'utilisation du métakaolin Argical 1000 accroît la résistance à la compression de 57 %. La microscopie électronique à balayage analytique révèle une adhérence solide entre les fibres et la matrice, assurant ainsi l'intégrité structurelle.

Modeling of urban heat island effect on thermal comfort in urban open spaces, case study : ESTP Cachan campus

Muath Owda^{1,*}, Arnaud Lapertot¹, Ibtissem Chriaa¹, Rita Sassine¹, Gilles Betis¹

* ✉ : mowda@estp.fr

¹ Institut de Recherche, ESTP, 94230 Cachan, France (France)

Mots clés : Urban sustainability, Urban heat island, Outdoor thermal comfort, Climate change.

Résumé :

Urbanization is a significant concern, with over 55 % of the world's population living in urban areas, and expected to increase to 68 % by 2050 [1]. Sustainable cities aim to address social, economic, and environmental challenges, improving quality of life, infrastructure, and economic development. One of the main challenges that face cities is climate change and a specific challenge called the urban heat island effect [2]. UHI is a phenomenon resulting in higher air temperatures in urban centers due to impervious surfaces, thermal capacity construction materials, and lack of permeable surfaces. Climate change increases UHI's impact, with global surface air temperatures expected to rise between 1.1 and 5.4 °C, leading to extreme temperatures and frequent heat waves. Summer heat waves can be particularly dangerous, increasing air pollution and energy consumption [3–5]. This study aims to model the urban heat island effect and its impact on thermal comfort in open urban spaces. As part of the ESTP campus redevelopment project, a case study will be conducted on its campus in Cachan, based on buildings 3D models using ENVI-met software, as well as some data collection for building characteristics within the campus will be conducted for the study. Using the microclimatic data, material characteristics for the surfaces of the campus, and the vegetation data, ENVI-met software, and simulation of the model were conducted on a heat-wave day to quantify the microclimatic data of the site. We will investigate whether the UHI effect on outdoor thermal comfort can be affected by the different manmade structures around the urban environment. In the continuation of this study, a framework that supports decision-making for stakeholders will be realized along with some sustainable solutions and scenarios that will be proposed to decrease any negative effect of UHI on outdoor thermal comfort that occurs in the results. [1] Nations, U. : 2018 Revision of World Urbanization Prospects, <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>, last accessed 2024/03/06. [2] Verma, P., Raghubanshi, A.S. : Urban sustainability indicators : Challenges and opportunities. *Ecological Indicators*. 93, 282–291 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.007>. [3] Kaur, H., Garg, P. : Urban sustainability assessment tools : A review. *Journal of Cleaner Production*. 210, 146–158 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.009>. [4] Keivani, R. : A review of the main challenges to urban sustainability. *International Journal of Urban Sustainable Development*. 1, 5–16 (2009). <https://doi.org/10.1080/19463131003704213>. [5] Li, D., Liao, W., Rigden, A.J., Liu, X., Wang, D., Malyshev, S., Shevliakova, E. : Urban heat island : Aerodynamics or imperviousness? *Sci. Adv.* 5, eaau4299 (2019). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau4299>.

Evaluation de la conductivité thermique de composites à base de fibres de *Furcraea foetida* et de plâtre

Julie Bascaules^{1,2,3,*}, Hélène Caillet¹, Olivier Marc¹, Chadi Maalouf², Laetitia Adelard¹

* ✉ : julie.bascaules@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire PIMENT, IUT de Saint-Pierre, 40 Avenue de Soweto, Saint-Pierre, La Réunion, France (La Réunion)

² Matériaux et Ingénierie Mécanique (France)

³ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France)

Mots clés : Fibres de feuilles, *Furcraea foetida*, matériaux, plâtre, composite, isolant, conductivité thermique

Résumé :

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une thèse visant au développement et à la caractérisation d'un matériau isolant à base de *Furcraea foetida*, une espèce végétale invasive à La Réunion. Ces investigations évaluent le potentiel de l'utilisation des fibres de *Furcraea foetida* comme renfort dans les matériaux de construction, contribuant ainsi à une gestion plus durable des espèces invasives tout en optimisant les propriétés thermiques des composites. Dans cette étude préliminaire, nous explorons la formulation et la caractérisation de composites de plâtre renforcé avec des fibres de *Furcraea foetida*. L'objectif principal est de mesurer la conductivité thermique de ce nouveau composite en incorporant des fibres à différentes concentrations massiques : 1 %, 0.66 % et 0.33 %. Pour établir des références, nous mesurerons la conductivité thermique du plâtre seul, puis des fibres de *Furcraea foetida*, préalablement découpées à une longueur de 2 cm. Ces données permettront d'évaluer l'amélioration des propriétés thermiques en fonction de la quantité de fibres intégrées au matériau, et de mieux comprendre les interactions interfaciales entre les deux matériaux. Ce travail préparatoire constitue une base pour des études plus approfondies sur les composites à base de *Furcraea foetida*, notamment l'amélioration de l'interface entre les fibres et le liant, ou l'étude du comportement hygrothermique du composite.

Etude préliminaire de la caractérisation des performances thermo-hydrauliques de nouveaux fluides caloporteurs

Saba Chamoun^{1,*}, Catalin Popa¹, Stéphane Fohanno¹

* ✉ : saba.chamoun@univ-reims.fr

¹ Institut de Thermique, Mécanique, Matériaux (France)

Mots clés : fluides caloporteurs, échangeur de chaleur, banc d'essai, coefficient d'échange convectif, performance énergétique, propriétés thermophysiques

Résumé :

Les changements climatiques et la diminution des énergies fossiles poussent à repenser notre approche de la production et de la consommation d'énergie, nécessitant une transformation des modes de vie pour éviter une crise économique, environnementale et sociale. La transition énergétique est devenue un sujet principal dans les débats publics, avec des enjeux technico-économiques liés à la production, la distribution et l'utilisation de l'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 utilisés dans ces systèmes sont traditionnellement des fluides newtoniens tels que l'eau, l'huile minérale et l'éthylène glycol. Cependant, les performances énergétiques de ces fluides sont 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 en mettant en suspension dans le fluide des particules solides de petites tailles afin de lui conférer des propriétés d'échange thermique (conductif et surtout convectif) plus importantes, tout en étant facilement exploitables du point de vue de leur mise en écoulement. Les particules solides présentent une conductivité thermique supérieure, leur ajout au fluide de base entraîne un changement dans leurs propriétés thermophysiques, permettant ainsi d'améliorer le transfert de chaleur. Un point majeur est également de pouvoir proposer des fluides caloporteurs innovants avec un impact minimal sur l'environnement et la santé. Les nanofluides ont longtemps été perçus comme fluides caloporteurs prometteurs, mais présentent des défis en termes de stabilité et de toxicité des nanoparticules. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet FLUIDINE, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-22-CE05-0017-01). Son objectif est de développer des suspensions dites non colloïdales, dans lesquelles les particules sont de taille micrométrique. Il comporte deux aspects principaux. Le premier consiste à développer une approche de métrologie thermo-fluidique avancée pour mesurer les propriétés thermiques, physiques et rhéologiques de ces suspensions en présence de cisaillement. La caractérisation des propriétés thermophysiques des fluides caloporteurs (capacité thermique massique, conductivité thermique, viscosité cinématique et masse volumique) sera réalisée selon un protocole similaire à celui développé pour une étude récente sur les nanofluides dans le laboratoire. Le second aspect portera sur la caractérisation expérimentale des performances thermohydrauliques des nouveaux fluides caloporteurs circulant dans des échangeurs réels. Les performances thermohydrauliques seront évaluées sur un banc d'essai d'échangeur de laboratoire dont les conditions thermiques sont particulièrement bien contrôlées. Cette évaluation s'appuiera notamment sur une méthode de mesure du coefficient d'échange convectif par thermographie infrarouge développée au sein de l'équipe de recherche. Dans cette communication, les différentes méthodes de caractérisation des propriétés thermophysiques des fluides caloporteurs étudiés sont présentées. Une description du banc d'essai utilisé pour mesurer les performances thermo-hydrauliques est également réalisée, ainsi qu'une présentation des premières mesures effectuées.

Work In Progress

Analyses expérimentales et numériques des émissions polluantes gazeuses et particulaires issues de la combustion biomasse

Abdelkader Izerroukyene^{1,*}, François Delcourt¹, François Beaubert¹, Damien Meresse¹, David Uystepruyst¹, Céline Morin¹, Sofiane Khelladi²

* ✉ : Abdelkader.Izerroukyene@uphf.fr

¹ Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines - UMR 8201 (France)

² Laboratoire de Dynamique des Fluides (Arts et Métiers ParisTech - Centre de Paris 151 Boulevard de l'Hopital 75 013 Paris Cedex France)

Mots clés : biomasse, émissions, modélisation

Résumé :

Dans le contexte environnemental actuel, la biomasse présente un intérêt grandissant en raison de son bilan carbone. Cependant, il est nécessaire d'évaluer son impact sur la qualité de l'air. La combustion d'une chaudière biomasse (pellets) de 10 kW est caractérisée en régime nominal. Différents types de capteurs (thermocouples, débitmètres, capteurs d'humidité relative) sont installés dans la conduite des fumées. Les émissions de particules sont mesurées via un spectromètre EEPS, le long de la cheminée de la chaudière pour mesurer la distribution en taille et la concentration des particules de les fumées. Des mesures sont réalisées à différentes positions de la cheminée pour évaluer l'évolution de la distribution, le dépôt et l'agglomération dans la conduite. Les émissions gazeuses sont obtenues par spectroscopie infrarouge (CO, CO₂, O₂) et par un détecteur à ionisation de flamme d'hydrogène (HCT). Au niveau des émissions particulaires, des différences significatives sont observées entre l'entrée et la sortie de la cheminée, avec une concentration moyenne en nombre de particules passant de 51 millions/cm³ à 39 millions/cm³ et un diamètre médian passant de 50,7nm à 58,1nm. Cette baisse de concentration et l'augmentation du diamètre médian peuvent s'expliquer à la fois par des phénomènes de dépôt sur la paroi le long de la cheminée et l'agglomération des particules nanométriques au cours de leur progression. Les émissions de gaz polluants sont relativement stables. La fraction molaire de CO est en moyenne de 465 ppm tandis que la fraction molaire de HCT est de l'ordre de 33ppm. Ces valeurs varient respectivement de 40 % et 50 % sur l'ensemble des 8 essais analysés. Les résultats mettent en évidence une forte corrélation temporelle entre l'émission de ces deux gaz. Les résultats obtenus sur les émissions de particules sont comparés à la déposition obtenue par une simulation CFD utilisant une fermeture de type RANS v2f et un modèle de dispersion particulaire. La simulation prend en compte les effets thermiques et la dispersion turbulente des particules avec un modèle DRW. Des similitudes sont mises en évidence quant à l'évolution de la distribution granulométrique et du nombre total de particules le long de la cheminée.

Thème 6

Transferts en milieux hétérogènes

Revue bibliographique menée par analyse de texte : application aux transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi poreuse biosourcée	126
Artificial Neural Networks -Driven Empirical Correlations for Enhanced Understanding of Closed-Loop Pulsating Heat Pipe Dynamics (CLPHP)	127
Modélisation multi-échelles des propriétés thermo-radiatives d'une céramique de CeO ₂ à haute température	128
Optimisation du transfert de chaleur dans un matériau à changement de phase par l'intermédiaire d'ailettes	129
Modélisation numérique des transferts thermiques lors de la trempe d'un alliage métallique oxydé .	130
Modélisation et simulation 3D de l'écoulement et du transfert thermique dans un réacteur tubulaire à lit de billes	131
Boundary Conditions in Hygrothermal Measurements of Biobased Material	132
Conductivity measurements on bio-based, cellulosic materials	133
Caractérisation thermique de matériaux textiles ou composites tissés périodiques par méthode flash - Aspects 3D et multiéchelles.	134

Revue bibliographique menée par analyse de texte : application aux transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi poreuse biosourcée

Yann Billaud^{1,*}, Florian Moreau¹, Xavier Milhet¹, Didier Saury¹

* ✉ : yann.billaud@ensma.fr

¹ Institut Pprime, UPR 3346 CNRS (France)

Mots clés : Paroi poreuse biosourcée, Transferts de chaleur, Transferts d'humidité

Résumé :

Après une introduction sur les enjeux liés à la performance énergétique des bâtiments, la notion d'énergie grise est discutée pour mettre en perspective la réglementation actuelle et déplorer la non prise en compte de la durée de vie des éléments de paroi. Un bref aperçu de l'évolution des techniques constructives couplée à des données relatives aux habitations principales issues du recensement permet d'identifier à la fois la proportion et la nature du bâti ancien dans le parc actuel. Les spécificités des matériaux constituant les maisons anciennes sont ensuite discutées, de même que leurs incompatibilités avec les techniques et matériaux d'isolation actuels, plus particulièrement vis-à-vis des transferts d'humidité dans les parois indispensables à la pérennité des ouvrages. Après un aperçu de l'ensemble des dispositifs mis en place pour limiter la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, des études mettant en doute l'efficacité de la politique de rénovation énergétique des 30 dernières années sont discutées. Ces études s'accordent sur l'importance de la prise en compte de l'énergie grise pour établir une stratégie efficace afin de relever le défi des enjeux énergétiques et climatiques, et de fait, l'importance de la durée de vie des bâtiments. Cette partie introductive se termine en mettant en avant l'intérêt porté aux parois biosourcées et plus particulièrement celles à base de chaux-chanvre. La partie suivante discute des performances thermiques imposées par la réglementation environnementale en évoquant les critères qui ne sont pas pris en compte. Cette réflexion soulève la nécessité d'effectuer une étude bibliographique approfondie dans le but d'identifier l'ensemble des éléments à prendre en compte pour être capable de juger de la pertinence de cette technique constructive, notamment pour une application à grande échelle. Pour cela une méthodologie de recherche bibliographique est proposée. Celle-ci repose sur l'utilisation d'outils de fouille de texte et de données appliqués sur des corpus d'articles téléchargés depuis une base de données. Les résultats sont analysés et commentés pour servir de base à l'élaboration d'un projet de recherche.

Artificial Neural Networks -Driven Empirical Correlations for Enhanced Understanding of Closed-Loop Pulsating Heat Pipe Dynamics (CLPHP)

Mira Ibrahim^{1,*}, Majed-Eddine Moustaid¹

* ✉ : mira.ibrahim@capgemini.com

¹ Capgemini Engineering (France)

Mots clés : Closed Loop Pulsating Heat Pipe Dynamics, Artificial Neural Networks

Résumé :

In the context of compact thermal devices producing excess heat, the effective control of thermal energy presents a complex challenge across diverse engineering domains. Closed Loop Pulsating Heat Pipes (CLPHPs), distinguished by their continuous pulsating vapor bubbles and liquid slug motions, emerge as a compelling solution for mitigating elevated heat loads. Their notable attributes, including exceptional thermal conductivity and adaptability to diverse orientations, position CLPHPs as a promising choice. Widely utilized in aerospace and electronics applications, the performance of CLPHPs is intricately tied to both design and operational considerations, mandating optimization for heightened efficiency. The primary objective of this study is to establish a semi-empirical correlation derived through the innovative application of Artificial Neural Networks (ANN). This correlation is based on a set of dimensionless numbers—Prandtl (Pr), Stephan (St), and Ohnesorge (Oh)— alongside key parameters such as the filling ratio (FR), inclination angle (θ), heat flux (q'') and a design characteristic factor. The resulting correlation proves instrumental in characterizing and optimizing CLPHPs across diverse applications as it contributes to predicting the thermal behavior of CLPHPs. The coolant temperature is considered as the characteristic temperature for dimensionless number calculation particularly during the early design stage when the average temperature of the evaporator and condenser is often unknown. A comprehensive database comprising varied CLPHP geometries and multiple operational points, extracted from existing literature, forms the basis of this research with 1400 experimental records. ANN models are constructed to predict CLPHP thermal resistance (K/W), and their hyperparameters are optimized for optimal accuracy. The model's efficacy is rigorously validated against this dataset, demonstrating strong agreement between predicted and actual results. Achieving a low Mean Squared Error (MSE) of 0.058, the ANN model establishes itself as a robust and accurate tool for predicting CLPHP thermal performance. This research not only advances our understanding of CLPHPs but also establishes a bridge between empirical correlations and ANN modeling, serving as a valuable reference for the broader application of pulsating heat pipes and offering enhanced predictive capabilities in complex thermal scenarios.

Modélisation multi-échelles des propriétés thermo-radiatives d'une céramique de CeO₂ à haute température

Léo Gaillard^{1,2,*}, Pierre-Marie Geffroy², Abderezak Aouali¹, Benoit Rousseau¹

* ✉ : leo.gaillard@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et d'Energie de Nantes (France)

² Institut de Recherche sur les CERamiques (France)

Mots clés : Conversion thermo-chimique solaire, Propriétés thermo radiatives, Modélisation multi-échelle

Résumé :

L'oxyde de cérium ou cérine (CeO₂) est un matériau parmi les plus prometteurs pour la production d'hydrogène vert par thermo-chimie solaire. Ce procédé de conversion décarbonné est basé sur l'exploitation d'un cycle thermo-chimique en deux étapes. Le cycle repose sur une première étape de réduction de CeO₂ menée à haute température (1500°C) sous faible pression partielle d'oxygène, puis sur une seconde étape d'oxydation du matériau réalisée à plus basse température (900°C). Les travaux antérieurs ont montré que les propriétés thermo-chimiques de CeO₂ garantissent des cycles efficaces cinétiquement et thermodynamiquement. Cependant, à ce jour, les propriétés thermo-radiatives de cet oxyde sont principalement connues à température ambiante et les régimes de transport des charges électriques induites par l'étape de réduction ont peu été évalués aux hautes températures (900-1500°C). Or la présence de charges électroniques peut générer des mécanismes d'absorption des rayonnements infrarouge et visible suffisants pour garantir à un échantillon d'épaisseur usuelle (de 100 µm à 1 mm d'épaisseur) un comportement radiatif opaque dans ces domaines spectraux. Les approches visant à designer numériquement des architectures 3D poreuses de CeO₂ à comportement thermique optimisé via des codes de Monte Carlo par Lancer de Rayon tiennent compte de cette hypothèse d'opacité. Or, les épaisseurs optiques sont obtenues via des grandeurs radiatives mesurées à température ambiante et qui plus est sur des céramiques épaisses (4 mm). Pour asseoir les approches de design, il est important de définir les propriétés radiatives de la cérine sur des échantillons dont la taille de grains et les épaisseurs identiques à celles des ligaments. Pour se faire, ce travail présente une modélisation multi-échelle du comportement radiatif d'une céramique de cérine de 2 mm d'épaisseur frittée à 1650°C. Cette céramique peut être décrite comme l'association compacte de grains homogènes sur le plan radiatif ayant une taille moyenne de 10 µm. A l'échelle des grains les mécanismes d'absorption du rayonnement sont impactés par le transport des charges électriques. Au niveau de la céramique, les grains sont susceptibles d'absorber et de diffuser collectivement le rayonnement. Dans un premier temps, les coefficients d'absorption et de diffusion effectifs de la céramique massive sont estimés à T= 20°C à partir d'un modèle à deux flux modifié, alimenté par des mesures de réflectance et de transmittance spectrales normales hémisphériques réalisées par spectroscopie infrarouge de 600 à 20 000 cm⁻¹. Le coefficient de diffusion effectif est fonction de la distribution de taille des grains et peut être vue comme une métrique inverse de la microstructure de la céramique. Puis dans un second temps, une modélisation de l'indice d'absorption intrinsèque de 900°C à 1500°C est réalisée par le modèle de fonction diélectrique complexe de Drude-Lorentz. Les paramètres de ce modèle sont déduits de mesures de conductivités électriques réalisées en température (T_{max} = 1500°C, PO_{2,min} = 10⁻⁵ atm) sur la même céramique de CeO₂. Les coefficients d'absorption effectifs en température sont alors calculés à partir des indices d'absorption précédents. Dans un troisième temps, à partir de la connaissance du coefficient de diffusion effectif supposé invariant de jusqu'à 1500°C et des coefficients d'absorption effectifs (900-1500°C) obtenus via l'approche de Drude-Lorentz, le modèle à 2 flux modifié est de nouveau utilisé pour prédire le comportement radiatif des ligaments d'une architecture 3D de CeO₂ sur la plage 900-1500°C.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2024-047>

Optimisation du transfert de chaleur dans un matériau à changement de phase par l'intermédiaire d'ailettes

Abderrahmane El Hanafi^{1,*}, Nicolas Blet¹, Kheiri Abdelhamid¹, Benjamin Remy¹

* ✉ : abderrahmane.el-hanafi@univ-lorraine.fr

¹ Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (France)

Mots clés : Matériau à changement de phase, Ailettes métalliques, Méthode des volumes finis, Stockage d'énergie thermique

Résumé :

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) pour améliorer la capacité de stockage de quantités substantielles de chaleur. La conception d'un système de stockage de chaleur à MCP présente deux critères majeurs : le choix de la température de changement de phase de MCP et la gestion de leur faible conductivité thermique lors du transfert. Les chercheurs ont étudié diverses approches pour améliorer la dynamique de transfert de chaleur dans un TES avec l'utilisation de MCP. Ces études ont été principalement numériques et ont été réalisées le plus souvent en régime permanent. Peu d'études antérieures ont porté sur une enceinte avec des ailettes métalliques incorporées dans le MCP. De plus, les rôles relatifs de la conduction et de la convection dans le transfert de chaleur global au sein du MCP n'ont pas été clairement abordés. Dans cet article, des outils expérimentaux et numériques sont utilisés pour étudier le comportement dynamique d'une enceinte rectangulaire avec des ailettes incorporées dans le MCP (paraffine RT42). Le montage expérimental est constitué d'une enceinte en Plexiglas remplie de MCP et équipée d'une plaque en cuivre verticale sur un de ses côtés, sur laquelle une condition limite de température cyclique (contrôlée par des cellules Peltier) est imposée. Une caméra infrarouge est utilisée pour mesurer les champs de température en 2D à travers une plaque en Téflon transparente aux infrarouges. Pour améliorer le transfert de chaleur à travers le MCP, les ailettes en cuivre sont positionnées perpendiculairement à la plaque en cuivre (donc horizontalement). Une simulation numérique 2D, prenant en compte à la fois le transfert de chaleur par conduction et convection dans le MCP, est réalisée à l'aide d'un logiciel de CFD commercial basé sur la méthode des volumes finis. La simulation a été validée par rapport aux résultats expérimentaux et permet la détermination des températures et des vitesses à l'intérieur du MCP, ainsi que le suivi de l'interface solide/liquide. Afin d'améliorer l'efficacité de stockage et de déstockage de chaleur du TES, ce travail s'intéresse particulièrement à l'utilisation d'ailettes de différentes longueurs sur la hauteur de l'enceinte.

Modélisation numérique des transferts thermiques lors de la trempe d'un alliage métallique oxydé

Thomas Varé^{1,*}, Sabine Denis², Julien Teixeira², Stéphane Mathieu², Vincent Schick¹, Michel Gradeck¹, David Maréchal³

* ✉ : thomas.vare@univ-lorraine.fr

¹ LEMTA (France)

² Institut Jean Lamour (France)

³ Institut de recherche technologique Matériaux Métallurgie et Procédés (France)

Mots clés : Trempe par aspersion, Traitement thermique, Modélisation numérique

Résumé :

La trempe par aspersion d'eau est un traitement thermique utilisé pour conférer aux aciers des propriétés de résistances mécaniques spécifiques. Cette opération consiste d'abord à porter l'acier à une température suffisante, généralement entre 800°C et 900°C, pour former de l'austénite. Après une période de maintien à une température supérieure à cette température d'austénitisation, l'acier est refroidi par aspersion d'une grande quantité d'eau liquide. Au cours de ce processus de refroidissement, l'acier subit différentes transformations de phases. Celles-ci dépendent de la température et de la vitesse de refroidissement et influent directement sur les microstructures et sur les propriétés mécaniques finales de l'acier. La ductilité du matériau, sa limite d'élasticité, sa résilience, ainsi que sa dureté sont les propriétés affectées par la trempe. Lors de la chauffe à l'air précédant la trempe, il est fréquent qu'une couche d'oxyde se développe sur la surface du métal. La conductivité des oxydes étant usuellement inférieure d'un ou deux ordres de grandeur à celle des métaux dont ils sont issus [1], les échanges thermiques vont être moindres lors de la trempe, ce qui va modifier la cinétique de refroidissement et donc la nature et la proportion des constituants formés lors de la décomposition de l'austénite. Par ailleurs, le contact entre la couche d'oxyde et le métal est généralement imparfait ce qui contribue à diminuer encore plus le flux dissipé et à l'isoler encore davantage (existence d'une résistance de contact). L'influence de cette couche d'oxyde sur la chaleur dissipée lors de la trempe et donc sur les propriétés de l'acier à l'issue de celle-ci est mal connue dans la littérature. L'objectif de ce travail est donc d'étudier numériquement son effet. Pour cela, un modèle numérique prenant en compte les différentes couches et interfaces est développé. Une attention particulière est donnée à la thermodépendance des paramètres physiques et la prise en compte des transformations de phase. De façon classique, les lois de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) et de Koistinen-Marburger sont utilisées afin de modéliser respectivement les transformations diffusives et displacive. Les cinétiques de transformation au refroidissement sont obtenues par la méthode de Scheil (incubation) et une hypothèse d'additivité afin de déterminer les fractions volumiques des différents constituants ainsi que la dureté en fin de trempe [2]. [1] C.V. Madhusudana. « Thermal Contact Conductance : Second Edition ». SPRINGER, Mechanical Engineering Series 2014, pp 236. [2] S. Denis, D. Farias, A. Simon. « Mathematical Model Coupling Phase Transformations and Temperature Evolutions in Steels. » ISIJ International 1992, pp 316-325. [3] A.V. S. Oliveira, J. Teixeira, V. Schick, D. Marechal, M. Gradeck, S.Denis. « Using a linear inverse heat conduction model to estimate the boundary heat flux with a material undergoing phase transformation. » Applied Thermal Engineering, 2023.

Modélisation et simulation 3D de l'écoulement et du transfert thermique dans un réacteur tubulaire à lit de billes

Liantsoa Randriambololona^{1,2,*}, Arnaud Cockx¹, Marie-José Huguet³, Philippe Schmitz¹, Olivier Peruch²

* ✉ : liantsoa.randriambololona@insa-toulouse.fr

¹ Toulouse Biotechnology Institute (France)

² Adisseo - CINACHEM (France)

³ LAAS-CNRS (France)

Mots clés : Réacteur tubulaire à lit de billes, Modélisation numérique, Méthode des éléments discrets

Résumé :

Les réacteurs catalytiques à lit fixe sont largement présents dans l'industrie chimique. D'un point de vue industriel, leur modélisation permet de mieux comprendre leur comportement, plus particulièrement le couplage entre l'écoulement, le transfert thermique et les réactions chimiques. Dans ce travail, on propose un modèle numérique tridimensionnel d'un réacteur à lit fixe monotubulaire composé de particules sphériques. Ce modèle est développé à l'aide du logiciel commercial COMSOL Multiphysics avec une géométrie générée grâce à la méthode DEM (Discrete Element Method) en utilisant le logiciel STARCCM+. L'objectif est d'étudier l'écoulement et le transfert thermique dans le réacteur et de comparer les résultats avec la littérature afin de valider le modèle 3D développé. Pour cela, un traitement particulier est réalisé au niveau des points de contacts entre particules ainsi qu'entre paroi et particules afin d'éviter des erreurs lors de la génération du maillage. Ces ponts de contacts sont alors modélisés par des parallélépipèdes de taille de l'ordre d'un dixième de diamètre des particules. De plus, pour réduire les temps de simulation, une technique de simulation numérique pseudopériodique est utilisée. Cette technique permet de développer le modèle sur une petite géométrie appelée Volume Élémentaire Représentative tout en permettant la simulation d'une plus grande géométrie. Les résultats des simulations concernent l'étude des différentes tailles de ponts de contacts sur la thermique pour un seul nombre de Reynolds. Ensuite, pour une taille donnée de ponts de contacts, différents nombres de Reynolds sont considérés. Les résultats montrent que la taille des ponts de contacts a peu d'impact sur l'écoulement et le transfert thermique dans le réacteur. Conformément à plusieurs études présentées dans la littérature, l'évolution de la perte de charge suit classiquement la loi d'Ergun. Quant au transfert thermique, un effet non négligeable de l'entrée du réacteur est constaté. Une comparaison plus fine avec des corrélations présentes dans la littérature issue d'études présentant plus ou moins la même géométrie que notre problème est alors réalisée. Ceci a permis de valider le modèle de transfert thermique en situation établie. Dans la zone proche de l'entrée, une nouvelle corrélation de transfert thermique ($Nu=f(Re, Pr)$) prenant en compte l'influence de la longueur d'établissement est proposée. Celle-ci permet de présenter plus précisément l'ensemble du réacteur depuis l'entrée dans la perspective de résoudre un modèle simplifié à une dimension.

Boundary Conditions in Hygrothermal Measurements of Biobased Material

Van Truong Nguyen¹, Karen Mourda^{1,*}, Rahima Sidi-Boulouar¹, Philippe Cousot¹

* ✉ : karen.mourda@univ-eiffel.fr

¹ Laboratoire Navier (France)

Mots clés : biobased materials, hygroscopic properties

Résumé :

Biobased materials have a significant appeal in the construction industry because of their sustainability. The hygroscopic properties of these materials play a very important role in various applications as they affect the mechanical properties, durability, and indoor environmental quality. The hygrothermal behavior of biobased construction and textile materials is influenced by various environmental factors such as temperature, relative humidity, airflow, and exposure to liquid water. In this context, precise management of boundary conditions is crucial for accurately forecasting the internal mass transport (specifically, bound water absorbed at the nanoscale within the amorphous regions of cellulose) and heat flow. To understand the intricate dynamics of heat and moisture transfer within dry cellulosic materials, our study delves into the temperature distribution throughout the sample over time. We examine how these materials respond when subjected to controlled dry airflow at a temperature different from the initial homogeneous temperature of the sample. We show that one can deduce the boundary conditions from the knowledge of the heat distribution in the sample. A similarity approach shows that they may be described by an expression involving a single unknown parameter (boundary layer thickness). On another side we carry out experiments now with a sample initially saturated with bound water and submitted to a dry air flux of the same temperature. We show the consistency of the two similarity approaches (for the mass and for the heat transport) by comparing the values of the boundary conditions in each case.

Conductivity measurements on bio-based, cellulosic materials

Karen Mourda¹, Yuliang Zou^{1,*}, Van Truong Nguyen¹, Philippe Coussot¹

* ✉ : yuliang.zou@univ-eiffel.fr

¹ Laboratoire Navier (France)

Mots clés : Biobased materials, Hygrothermal properties, Vapor absorption

Résumé :

The use of bio-based materials in construction can greatly reduce carbon dioxide emissions through : their sustainable production, their contribution to air quality in housings, the reduction of energy consumption for heating or cooling in building which they induce, their partial or full recyclability, and their role of carbon sink. The original hygrothermal properties of these materials are in part due to one remarkable property : their ability to absorb vapor in the form of nanoscale water inclusions between the microfibrils of cellulosic fibers. The ERC Advanced Grant PHYSBIOMAT project aims at developing a physical approach to the hygrothermal behavior of such materials. Within this framework, one particular challenge is to measure the thermal conductivity of these poorly conductive materials. By using a standard Heat Flow Meter we encountered anomalies attributed to edge effects, i.e., radial heat flux deviations, prompting a reevaluation of measurement strategies. Our investigations revealed that conventional thickness limitations are insufficient for accurate thermal conductivity assessments, leading to the innovative analysis of heat flux at both sample interfaces. This approach uncovered that for larger sample thicknesses, an unconventional in-flow of heat from both the top and bottom plates occurs, significantly affecting measurement accuracy. By integrating these findings with simulation comparisons and measuring temperature distribution by thermocouples, we offer novel insights into minimizing errors and refining the thermal conductivity measurement process for insulating materials. On this basis we can now look at the thermal conductivity of cellulose samples of different porosities and bound water saturations and analyze these variations taking into account the fiber orientation.

Caractérisation thermique de matériaux textiles ou composites tissés périodiques par méthode flash - Aspects 3D et multiéchelles.

Célia Sanz^{1,*}, Jean-Christophe Batsale¹, Andrzej Kusiak¹, Alain Sommier¹, Laurent Ferres², Céline Apeceixborde²

* ✉ : celia.sanz@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie (France)

² IRT Saint Exupéry - Institut de Recherche Technologique (France)

Mots clés : Caractérisation thermique, Matériaux textiles, Composites tissés périodiques, Méthode flash

Résumé :

Cette étude présente des résultats préliminaires pour la caractérisation thermique de l'imprégnation de matériaux textiles ou composites à base de fibres tissées. Ce type de matériau constitue la base de nombreux matériaux composites. Il est en général de faible épaisseur (inférieure au millimètre) et présente uniquement quelques couches de tissus avec un niveau d'imprégnation hétérogène qu'il est utile de caractériser pour suivre les processus de fabrication. Suivant l'imprégnation, le transfert thermique dans l'épaisseur et dans le plan du matériau est plus ou moins favorisé et ouvre la voie à l'implémentation de méthodes telles que la méthode flash avec des traitements multiéchelles des rafales d'images infrarouges obtenues en réponse de l'excitation thermique impulsionnelle. L'hétérogénéité du transfert dans l'épaisseur et dans le plan peut être étudiée en analysant les rafales d'images à plusieurs niveaux d'observation.

Liste des auteurs

A

Abdelhamid, Kheiri	47, 129
Abisset-Chavanne, Emanuelle	85
Acem, Zoubir	33
Achchaq, Fouzia	14
Adelard, Laetitia	122
Ait Oumeziane, Yacine	35, 38
Aketouane, Zakaria	25
Allam, Hamza	106
Andre, Christophe	60
André, Frédéric	53
Anquetin, Yann	84
Aouali, Abderezak	128
Apheceixborde, Céline	134
Arcen, Boris	47
Aridi, Mona	20
Aridi, Rima	20
Atlane, Fatima-Zahra	41
Avrit, Antoine	55
Ayaz, Hamza	19
Ayela, Frederic	9

B

Badia, Ayoub	54
Badosa, Jordi	8
Baffie, Thierry	111
Bahrani, S. Amir	26
Bailleul, Jean-Luc	79
Bajji, Said	71
Bakour, Nadia	45
Banes, Candice	8
Baresch, Diego	14
Barthélémy, Adrien	58
Bascaules, Julie	122
Basecq, Vincent	82
Baseri, Gholamhossein Kahid	18
Bataille, Françoise	46, 61, 74
Batsale, Jean-Christophe	14, 134
Battaglia, Jean-Luc	87, 92
Baucour, Philippe	50
Beaubert, François	124
Beaudet, Cyprien	15

Beceiro, Jorge Salgado	18, 19
Bédécarrats, Jean-Pierre	18, 19
Begot, Sylvie	27, 32, 35
Ben Ahmed, Haykel	37
Ben Ali, Samia	14
Ben Ezzine, Nizar	38
Berramdane, Mohammed Riadh	86
Bérut, Elise	21
Betis, Gilles	121
Billaud, Yann	126
Blanco, Stéphane	51, 75
Blet, Nicolas	78, 129
Bois, Laurence	21
Bois, Mathilde	119
Bompas, Jeremy	64
Bonhomme, Marion	70
Boonaert, Jacques	11
Bouazizi, Maram	38
Boudenne, Abdel	34
Boudenne, Abderrahim	106
Bougeard, Daniel	11, 60, 101, 105
Boulet, Pascal	33
Bourarach, Fadi Mehdi	36
Bourbia, Sofiane	45
Bourdin, Vincent	8
Boussaid, Mohamed	37
Bouteille, Patrick	59
Bouvenot, Jean-Baptiste	15, 114
Bouvier, Pascale	60
Bouzouidja, Ryad	25
Brazane, Samy	80
Briottet, Xavier	53
Brissot, Charles	54
Butaye, Edouard	74

C

Caballina, Ophélie	90
Cabrit, Benjamin	100, 115
Caillet, Hélène	122
Caliot, Cyril	51, 67, 73, 75
Caney, Nadia	116
Cao, Pengfei	110

Carin, Muriel	49
Carrock, Joseph	91
Castanet, Guillaume	31, 90
Charaoui, Nathaly	83
Chamoun, Saba	123
Champel, Bénédicte	119
Chardome, Geoffroy	97
Charton, Hugues	5
Chehade, Sara	34
Cherry, Léa	46
Chevalier, Stéphane	87, 92, 93
Chopard, Etienne	72
Chouippe, Agathe	68
Chriaa, Ibtissem	121
Cifuentes, Renato	112
Cockx, Arnaud	131
Coin, Caroline	14
Colinart, Thibaut	109
Collignon, Romain	57
Collin, Anthony	102
Colombet, Damien	9
Corneloup, Christophe	50
Coste, Pierre	111
Courtois, Mickael	49
Coussot, Philippe	132, 133
Coustet, Christophe	67
Crouau, Florian	87

D

D'alençon, Louis	51
Dantu, Sylvain	6
Dauchet, Jérémie	75
Daurenjou, Vincent	30
Deflandre, Laura	58
Degiovanni, Alain	65
Delacour, Quentin	102
Delacourt, Eric	117, 118
Delaleux, Fabien	6, 80
Delasse, Chaimaa	112
Delcourt, François	124
Delebecque, Pierre	9
Demim, Fethi	37
Denis, Sabine	130
De Paepe, Ward	64
Desevaux, Philippe	35, 38, 50
Djerbi, Assia	120
Djermoune, Asma	55
Dony, Anne	82
Dorville, Nicolas	62
Dubas, Frédéric	50
Dujardin, Nicolas	34, 120
Duluc, Marie-Christine	62
Dumont, Antoine	91

Dumont, Olivier	24
Dupont, Fabien	91
Dupuy, Arthur	99
Durand, Sullivan	23
Durastanti, Jean-Félix	6, 80
Durivault-Reymond, Laurence	82
Duvaut, Thierry	83

E

Eibner, Simon	75
El Ahmadi Aroussi, Mortada	27
El Alami, Mustapha	41
El Arabi, Ali	78
El Assaad, Machhour	109
El Hafi, Mouna	75
El Hanafi, Abderrahmane	129
Elhani, Nouhaila	26
El Helou, Patrick	98
Elkarii, Marwane	26
El Maakoul, Anas	65
El Mankibi, Fatima	38
El Rassy, Elissa	79
El Zein, Nour	35
Etienne, Lucien	11
Eymet, Vincent	67, 75

F

Falcand, Rémi	50
Faraji, Mustapha	69
Faraj, Jalal	79
Farges, Olivier	75
Favennec, Yann	75
Feidt, Michel	7
Feldheim, Véronique	97, 105
Ferdjallah, Lydia	13
Ferres, Laurent	134
Feuillet, Vincent	16
Filaine, Frédéric	110
Flamant, Gilles	46
Fohanno, Stéphane	123
Fois, Magali	13
Forest, Vincent	51
Fournier, Richard	51, 75
Fuentes, Adrien	98
Funfschilling, Denis	68

G

Gabory, Elias	52
Gaillard, Léo	128
Galtier, Mathieu	52, 53
Gaume, Benjamin	8
Gautheron, Arthur	52
Gautron, Laurent	120

Gaverina, Ludovic.....	59
Geffroy, Pierre-Marie.....	128
Geslain, Edouard.....	88
Getie, Muluken Z.....	32
Gibout, Stéphane.....	36
Ginestet, Stéphane.....	70
Giovannacci, David.....	34
Giuffrida, Giada.....	106
Glantz, Tony.....	103
Gloriod, Damien.....	111
Glouannec, Patrick.....	98
Gounni, Ayoub.....	41
Gradeck, Michel.....	55, 103, 119, 130
Gresse, Teddy.....	53
Grosu, Lavinia.....	99
Groz, Marie-Marthe.....	14, 85
Guerroudj, Nawal.....	22
Guo, Xiaofeng.....	110
Gustave, Pierre-Olivier.....	100, 115
Guyot, Eric.....	91

H

Haillot, Didier.....	23
Hajjar, Abboud.....	82
Harel, Fabien.....	27
Hoarau, Yannick.....	68
Hourdin, Frédéric.....	51
Houssein, Jad.....	49
Hubert, Tessa.....	25
Huguet, Marie-José.....	131

I

Ibos, Laurent.....	13, 16, 80, 106
Ibrahim, Mira.....	127
Ilinca, Adrian.....	101
Izerroukyene, Abdelkader.....	124

J

Jacob, Jérôme.....	53
Jammet, Vincent.....	115
Janiaut, Franck.....	102
Jannot, Yves.....	17
Jezequel, Stéphane.....	9
Joly, Frédéric.....	49
Jourda, Paul.....	54

K

Kamtcheu, Marc.....	118
Karkaba, Hassan.....	11
Kastendeuch, Pierre.....	112
Kazeoui, Habiba.....	45
Khalij, Mohammed.....	41, 47
Khay, Ismail.....	65
Kheiri, Abdelhamid.....	22, 41

Khelladi, Sofiane.....	124
Kossakowski, Roman.....	9
Krapez, Jean-Claude.....	53
Krause, Kevin.....	92
Kusiak, Andrzej.....	134
Kuznik, Frédéric.....	53

L

Labat, Matthieu.....	70, 118
Labergue, Alexandre.....	31, 103
Lacroix, David.....	63
Lahayrech, Safaa.....	65
Landes, Tania.....	112
Lanzetta, François.....	32
Lapertot, Arnaud.....	82, 121
Lara Cruz, José Luiz.....	18, 19, 25
Lawane Gana, Abdou.....	108
Layes, Guillaume.....	27
Le Bideau, Pascal.....	98
Lech, Stanislas.....	59
Leclerc, Côme.....	33
Lecoanet, Alexandre.....	55
Lecoeuche, Stephane.....	11
Lecompte, Thibaut.....	109
Lecomte, Vincent.....	112
Lecorgne, Malo.....	85
Lefevre, Nicolas.....	79
Le Gall, Guillaume.....	73
Legros, Philippe.....	14
Lemaout, Yannick.....	59
Lemenand, Thierry.....	20
Lemoine, Philippe.....	117
Lemort, Vincent.....	24
Le Pierrès, Nolwenn.....	21
Lepiller, Valérie.....	27, 35, 38
Leroy, Maxime.....	17
Liemans, Benoit.....	105
Lin, Jian.....	10
Louvet, Nicolas.....	17
Lucas, Franck.....	48
Luna Valencia, Juan Esteban.....	103

M

Maalouf, Chadi.....	122
Macher, Hélène.....	112
Maftah, Anas.....	25
Maillet, Denis.....	78
Maire, Jérémie.....	87, 93
Mancaux, Jean-Marie.....	12, 81
Marc, Olivier.....	48, 122
Maréchal, David.....	130
Mariotto, Mathieu.....	119
Masselin, Bertrand.....	33

Mathelin, Lionel	61	Payebien, Benoît	116
Mathieu, Stéphane	130	Pelay, Ugo	11
Maton, Régis	115	Pellé, Julien	117
Matry, Hugo	70	Penazzi, Léa	75
Mehaddi, Rabah	33	Pernot, Gilles	63
Mehrez, Insaf	117	Perret, Christian	5
Meresse, Damien	124	Peruch, Olivier	131
Merlier, Lucie	53	Phan, Hai Trieu	5, 57
Mer, Samuel	74	Piaud, Benjamin	67
Métivier, Christel	17	Pierre, Thomas	49, 88
Migan-Dubois, Anne	8	Pierro, Jean	53
Milhet, Xavier	126	Piton, Bernard	117
Minale, Temesgen Assefa	32	Plantec, Yohan	109
Minvielle, Zoé	111	Popa, Catalin	123
Moebel, Elodie	58	Potaufoux, Thomas	90
Montcel, Bruno	52	Poulesquen, Arnaud	54
Moreau, Florian	30, 126	Pradère, Christsophe	85
Morin, Céline	124	Prévost, Sylvain	100, 115
Mortada, Mostafa	16		
Mourda, Karen	132, 133	Q	
Moussallem, Rita	79	Quemener, Olivier	8, 49
Moustaid, Majed-Eddine	127		
Musy, Marjorie	53	R	
		Rabbi, Jawad	18
N		Ramousse, Julien	73
Nadau, Lionel	101	Randriambololona, Liantsoa	131
Naimi, Youssef	71	Raybaud, Perceval	48
Najjar, Georges	112	Remy, Benjamin	58, 78, 129
Nasereldine, Hussein	120	Reneaume, Jean-Michel	25, 56
Nerry, Françoise	53, 112	Renzhi, Wang	66
Netter, Abel	93	Retailleau, Florent	51
Neven, Elise	24	Reulet, Philippe	107
Nguyen, Philippe	50	Richermoz, Nathan	111
Nguyen, Van Truong	132, 133	Rigal, Clément	68
Nkenfack, Isibert	63	Rigollet, Fabrice	75
Noël, Romain	68	Rimbert, Nicolas	55
Nop, Raksmy	62	Riou, Olivier	80
Nowamooz, Hossein	66, 114	Robin, Stéphane	115
		Robin, Vincent	72
O		Rochais, Denis	75
Oliveira, Arthur V.S	103	Roche, Jean-Michel	59
Olivès, Régis	12, 81	Rodiet, Christophe	89
Ologaray, Gabriel	74	Rodler, Auline	53
Ondarts, Michel	21	Roger, Maxime	52
Oueslati, Walid	38	Romano, Francesco	26
Ouhaine, Lahoucine	113	Rotan, Magnus	18, 19
Ouoba/nébié, Bazam Amonet	108	Roumet, Elie	62
Outin, Jonathan	21	Roupioz, Laure	53
Owda, Muath	121	Rousseau, Benoit	75, 128
		Rousse, Daniel	23
P		Royer, Quentin	40
Pannier, Marie-Lise	20	Royon, Laurent	110
Parra, Johan	8	Russeil, Serge	11, 60, 105

S

Saba, Ahmed	71
Saidi, Sirine	99
Salem, Thouraya	120
Sanjivy, Kanhan	48
Sanz, Célia	134
Sassine, Rita	121
Saury, Didier	30, 126
Saute, Benjamin	91
Schick, Vincent	58, 130
Schmitt, Felix	53
Schmitz, Philippe	131
Schoetter, Robert	51, 67
Seiler, Nathalie	55
Semeraro, Onofrio	61
Sempey, Alain	25
Serra, Sylvain	56
Sevault, Alexis	18, 19
Sidi-Boulouar, Rahima	132
Simo Tala, Jules	11
Simo Tala, Jules Voguelin	101
Siroux, Monica	10, 65, 104, 108, 118
Skali Lami, Salaheddine	47
Slama, Bruno	100, 115
Slama, Lise	100, 115
Sleiman, Jana	57
Sochard, Sabine	25, 56
Sokakini, Soumaya	101
Sommier, Alain	14, 85, 134
Soriano, Julie	53
Soulhac, Lionel	53
Sæterli, Ragnhild	18, 19
Striegel, Lucas	114
Stutz, Benoit	57

T

Taleb, Adel	37
Taleb, Kaoutar	31
Tang, Fujiao	66
Tan, Qianwen	104

Tauveron, Nicolas	116
Teggour, Riad	47
Teixeira, Julien	130
Terrei, Lucas	102
Thebault, Martin	73
Thomé, Olivier	24
Topin, Frédéric	75
Toutant, Adrien	61, 74
Tran, Khanh-Hung	99
Trannoy, Nathalie	83
Tuomiranta, Arttu	36

U

Untrau, Alix	56
Uystepruyst, David	124

V

Vacher, Maxime	9
Varé, Thomas	130
Veca, Morgane	107
Vicente, Jerome	75
Vignoles, Gerard	75
Villefranque, Najda	51
Villemin, Thomas	58
Vullum-Bruer, Fride	18, 19

W

Walther, Edouard	114
------------------------	-----

Y

Yahiat, Feriel	60
Yousaf Malik, Muhammad	38

Z

Zalachas, Nicolas	100, 115
Zanatta, Luca	6
Zatout, Yanis	61
Zeitoun, Wael	10
Zemani-Kaci, Farah	39
Zibouche, Kamel	16
Zou, Yuliang	133