

THERMIQUE ET DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

MICHEL GRADECK
VINCENT SCHICK

RECUEIL DES RÉSUMÉS

DU

CONGRÈS ANNUEL DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DE THERMIQUE

SFT 2026

2-5 JUIN 2026
NANCY

ORGANISÉ PAR

LEMTA (UMR 7563 - CNRS - UNIVERSITÉ DE LORRAINE)

partie I

Préface

Parrainages

Le 34ème Congrès Annuel de la Société Française de Thermique, organisé par le LEMTA, a bénéficié du parrainage et du soutien financier des institutions et des organismes suivants :

Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée (UMR 7563)

2 avenue de la Forêt de Haye
BP 90161
54505 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex
<https://lemta.univ-lorraine.fr/>



CNRS

<https://www.cnrs.fr>



Université de Lorraine

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



Région Grand-Est

Place Gabriel Hanoteau
57000 Metz
<https://www.grandest.fr/>



Métropole du Grand Nancy

22-24 Viaduc Kennedy
54000 Nancy
<https://www.grandnancy.eu/accueil>



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

THEMACS Ingénierie

2 bis rue Alfred Nobel
77420 Champs-sur-Marne, France
<https://themacs-engineering.com>
Contact : Jean-Pierre MONCHAU
☎ 06 29 82 44 34
✉ monchau@themacs.fr



LaVision GmbH

Anna-Vandenhoeck-Ring 19
37081 Göttingen, Germany
<https://www.lavision.de/fr/>
Contact : Cédric DEGOUET
✉ infofrance@lavision.com



COMSOL France

26 rue Gustave Eiffel
38000 Grenoble, France
<https://www.comsol.com>
Contact : Frédéric BERNARD
☎ 04 76 46 49 01
✉ frederic.bernard@comsol.fr



ImproveHeat

<https://www.improveheat.com>
Contact : Florian PICARD
☎ +33 6 40 77 72 71
✉ florian.picard@improveheat.com



Exosens

<https://www.exosens.com/fr/brands/telops>
Contact : Stéphanie GUERARD
☎ +1 (418) 864-7808
✉ s.guerard@exosens.com



Remerciements

Le Comité d'organisation du 34ème Congrès Annuel de la Société Française de Thermique adresse ses plus vifs remerciements :

- Au Conseil d'Administration et au Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique pour leur soutien et leur confiance.
- À tous les membres du comité scientifique qui ont contribué à l'évaluation des communications.
- Aux relecteurs qui ont pris le temps de lire et d'expertiser les articles soumis au congrès.
- À nos partenaires institutionnels et industriels pour leur soutien.
- À tous les participants qui font de ce congrès un moment d'échange scientifique privilégié.

Le Comité d'organisation SFT 2026

Comité d'organisation

Équipe locale

Le congrès 34ème Congrès Annuel de la Société Française de Thermique s'est organisé par l'équipe locale du Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée.

Président : Michel Gradeck
Vincent Schick

Membres : Olivier Farges - Communications scientifiques - Site web
Christelle Moine - Communication et logistique événementielle
Ludovic Buhler
Virginie Grandemange - Secrétariat administratif
Benjamin Rémy
Nicolas Blet
Alexandre Labergue
Guillaume Castanet
Ophélie Caballina
Anthony Collin
Gilles Parent
Pascal Boulet
Zoubir Acem

Liste des relecteurs

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

Aouali Abderezak	Vincent Ayel	Jean-Luc Bailleul
Françoise Bataille	Jean-Luc Battaglia	Philippe Baucour
Nicolas Baudin	Jérôme Bellettre	Nicolas Blet
Jean Luc Bodnar	Daniel Bougeard	Pascal Boulet
Jean-Pierre Bédécarrats	Cyril Caliot	Guillaume Castanet
Cathy Castelain	Khaled Chetehouna	Stéphane Chevalier
Romain Collignon	Fabien Delaleux	Sébastien Denis
Bernard Desmet	David Donjat	Marie-Christine Duluc
Marie Duquesne	Thierry Duvaut	Olivier Farges
Thomas Fasquelle	Michel Feidt	Matthieu Fenot
Stéphane Fohanno	Jonathan Gaspar	Edouard Geslain
Rémi Gilblas	Florine Giraud	Michel Gradeck
Philippe Haberschill	Jean-Luc Harion	Christophe Journeau
Abdelhamid Kheiri	Mohammed Lachi	Francois Lanzetta
José Luiz Lara Cruz	Pascal Le Bideau	Philippe Le Masson
Nolwenn Le Pierrès	Damien Lecointe	Thierry Lemenand
Denis Lemonnier	Laurent Libessart	Denis Maillet
Johann Meulemans	Pierre Millan	Xavier Nicolas
Régis Olivès	Léa Penazzi	Hai Trieu Phan
Thomas Pierre	Jaona Randrianalisoa	Benjamin Remy
Jean-Michel Reneaume	Philippe Reulet	Fabrice Rigollet
Christophe Rodiet	Simon Rouchier	Yassine Rouizi
Jean-Claude Roy	Olivier Rozenbaum	Romuald Rulliere
Serge Russeil	Christian Ruyer-Quil	Patrick Salagnac
Didier Saury	Vincent Schick	Jean-Paul Serin
Sylvain Serra	Monica Siroux	Jérôme Soto
Benoit Stutz	Lounès Tadrir	Martin Thebault
Adrien Toutant	Nathalie Trannoy	

Le mot du comité d'organisation

Chaque année, la Société Française de Thermique organise un congrès afin de permettre à l'ensemble des thermiciens de se retrouver, d'exposer leurs travaux les plus récents, d'échanger et débattre autour de problématiques fondamentales ou appliquées, en lien avec l'industrie et la société. C'est aussi l'occasion de mettre en avant de jeunes thermiciens qui concourent au prix Biot-Fourier.

Cette année, le congrès de la Société Française de Thermique 2026 s'installe à Nancy du 2 au 5 juin, organisé par le LEMTA, Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique & Appliquée, unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université de Lorraine.

Ces dernières années, les thèmes du congrès ont souvent reflété un ancrage territorial profond, associé aussi à des enjeux sociétaux et industriels. Nous n'y avons pas dérogé pour cette édition. Le thème de cette 34ème édition est « thermique & décarbonation de l'industrie ». Par ce choix, le comité d'organisation local souhaite non seulement montrer l'intérêt que les thermiciens portent à la décarbonation, mais aussi montrer comment ce territoire historiquement industriel, au carrefour de l'Europe, est aussi résolument porteur d'innovations et acteur des transitions. Ici, des liens forts existent et existeront toujours entre l'industrie et les acteurs académiques lorrains. Le LEMTA, laboratoire de plus de 50 ans, est héritier de cette histoire et est fier de vous accueillir à Nancy.

La Lorraine a été et reste un territoire minier, sidérurgique, profondément industriel et marqué par les industries lourdes. Rappelons que le fer de la tour Eiffel est sorti de ses entrailles ; c'est feu la société des hauts fourneaux, forges et aciéries de Pompey (10 km de Nancy) qui a fourni tout le fer extrait ici et nécessaire à la construction de la tour Eiffel, 6370 tonnes au total. Si la sidérurgie est encore forte en Lorraine, cette région d'industries lourdes possède aussi d'autres atouts qui permettent d'entrevoir un avenir industriel riche et renouvelé. Par le passé et jusqu'à aujourd'hui, l'Université de Lorraine et ses laboratoires de recherche dont le LEMTA, accompagnent la R&D des entreprises, participant à l'amélioration et au contrôle des procédés.

Les industries lourdes sont, par nature, des industries d'extraction et de transformation qui demandent une utilisation d'équipements massifs nécessitant des ressources énergétiques considérables, par conséquent très émettrices de CO₂ ; diminuer les émissions représente des défis pour les sciences thermiques. Pour faire face aux enjeux climatiques, la décarbonation est une nécessité. Comment réduire nos émissions tout en conservant nos industries, nos emplois ? Au travers des conférences plénières, nous verrons que l'équation n'est pas facile à résoudre, que les laboratoires de recherche sont pleinement impliqués et que la thermique est bien souvent au cœur de ces problématiques qui demandent aussi de l'interdisciplinarité. Les sept conférences plénières programmées permettront de vous donner un aperçu de la dynamique engagée sur le chemin de la décarbonation, ses contraintes, ses nombreux défis auxquels les thermiciens sont confrontés :

- Fabrice Lemoine (Université de Lorraine) "Décarboner l'industrie : challenges et leviers"
- Akshay Bansal (ArcelorMittal R&D) "Saisir l'efficacité énergétique des procédés comme moteur de la transition énergétique et de la décarbonation de l'industrie sidérurgique"

- Rodolphe Vaillon (CNRS LAAS) "Batteries thermophotovoltaïques : principes et application à la décarbonation de l'industrie"
- Anaïs Voy-Gillis & Julien Luraschi (HUMENS-Novacarb) "Souveraineté énergétique et décarbonation industrielle : le cas Novacarb"
- Christine Rousselle (Université d'Orléans) "Ammoniac comme vecteur énergétique et carburant"
- Silvia Lasala (Université de Lorraine) "Améliorer l'efficacité des cycles thermodynamiques grâce à des fluides de travail réactifs"
- Lionel Durantay (GE Vernova) "Décarbonation et électrification des services de compression"

Des ateliers sont également au programme, en lien avec les groupes thématiques de la SFT ou en lien avec la thématique du congrès :

- Hautes températures
- METTI
- Autour du PEPR SPLEEN
- Low-tech
- Cahiers de la Thermique
- Thermographie

Pour cette édition, nous avons reçu 141 propositions de résumés, 73 communications ont été acceptées pour publications dans les actes, 68 ont été retenues au titre de « work in progress ». C'est donc un total de 141 affiches autour desquelles vous pourrez discuter. Le conseil scientifique de la SFT a sélectionné 6 communications pour le prix Biot Fourier ; ces communications feront l'objet d'un numéro spécial de la revue Entropie. Nous remercions la Société Française de Thermique de nous avoir fait confiance pour organiser cette 34^{ème} édition. Nous souhaitons à tous les congressistes des moments riches en partage, en discussion et nous espérons aussi que de nouvelles synergies vont s'opérer à l'issue du congrès. Le comité d'organisation, fier de vous accueillir dans cette ville à la croisée des savoirs et des industries, vous souhaite un excellent congrès 2026 !

Vincent SCHICK et Michel GRADECK et l'ensemble du comité d'organisation local

Prix Biot-Fourier

6 contributions ont été présélectionnées pour le Prix Biot-Fourier.

Les auteurs présenteront leurs travaux à l'occasion de sessions orales.

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

Un couplage spectroscopie-transfert radiatif en four industriel : une approche sans approximation physique ni réduction de la donnée

Antoni Augé, Olivier Farges, Yaniss Nyffenegger-Péré, Olivier Rozenbaum, Christophe Coustet, Mégane Bati, Vincent Eymet, Vincent Forest, Louis Piquard

Reconstruction précise du flux thermique lors de l'impact d'une goutte par thermographie IR sur substrat chauffé en saphir.

Thomas Potaufoux, Ophélie Caballina, Guillaume Castanet, Thierry Czerwicz

Caractérisation dynamique d'un capteur de flux de chaleur micro-fabriquée

Himanshi Kharkwal, Eric Gavignet, Sébastien Euphrasie, Syed Shah, Abbas Hamieh, Magali Barthes, Lounès Tadriss, François Lanzetta

Calcul précis et rapide du rayonnement thermique dans les gaz de combustion CO –H₂O pour les procédés industriels décarbonés

Bowen Wang, Sylvain Contassot-Vivier, Fatmir Asllanaj, Fabien Pascale

Identification d'un modèle d'état réduit et de l'entrée thermique inconnue pour la reconstruction 3D du champ de température en thermoablation

Mariana De Melo Antunes, Jean-Luc Battaglia, Ida Burgers, Nino Avetikovi, Valery Ozenne, Sandro M. M. De Lima E Silva

Caractérisation thermophysique de dépôts surfaciques sur composant face au plasma : quelle modélisation thermique du couple dépôt-substrat ?

Clément Monet-Vidonne, Fabrice Rigollet, Jonathan Gaspar, Jean-Laurent Gardarein, Nathalie Ehret, Mathilde Diez, Céline Martin, Gregory Giacometti

Table des matières

I	Préface	iii
	Comité d'organisation	ix
	Liste des relecteurs	xi
	Prix Biot-Fourier	xv
	Table des matières	xvi
II	Résumé des communications	1
	Thème 1	3
1	Applications thermiques dans l'industrie et décarbonation de l'industrie	3
	Électrification des fours réverbères de refusion d'aluminium par torche plasma : enjeux thermiques sur un démonstrateur industriel	4
	Optimisation du transfert thermique pour la décarbonation des procédés de liquéfaction du gaz naturel.	5
	Analyse de l'écoulement d'air autour d'un cylindre en convection mixte	6
	Caractérisation et optimisation avancées des transferts thermiques : couplage de capteurs intelligents, modélisation multi-physique et intelligence artificielle	7
	Measurement, Modelling, Optimization on stainless steel annealing furnaces	8
	Sizing of Supercritical Fluid Heat Transport Loop for Aircraft Propulsion	9
	Thème 2	11
2	Applications thermiques dans le domaine du vivant	11
	Estimation d'une source de chaleur dans un milieu biologique sur la base d'un modèle d'apprentissage informé par la physique	12
	Identification d'un modèle d'état réduit et de l'entrée thermique inconnue pour la reconstruction 3D du champ de température en thermoablation	13

Étude de l'échauffement d'implants médicaux soumis à des champs magnétiques basses fréquences.	14
--	----

Thème 3 15

3 Applications thermiques des énergies renouvelables 15

Analyse des Performances Thermoélectriques d'un Capteur Solaire Hybride PV/T à Air : Influence du Nombre d'Ailettes et de la Vitesse d'écoulement	16
Concept de rareté thermodynamique des ressources pour la sélection de procédés de production de chaleur décarbonée	17
Évaluation à l'échelle système de composants innovants pour les collecteurs cylindro-paraboliques	18
Modélisation semi-analytique d'un revêtement sélectif plasmoniques pour le solaire thermique	19
SHIP4D : La chaleur solaire pour la décarbonation des processus industriels	20
Analyse du potentiel thermohydraulique des stations de relevage post-minières dans le bassin minier des Hauts-de-France	21
Bio-2,3-butanediol production from banana waste : Preliminary techno-economic evaluation of processing strategies	22
Etude de la production de granulat à partir du frittage de sable sous flux solaire concentré	23
Évaluation globale des impacts environnementaux, sociaux et économiques : étude comparative d'énergies renouvelables et non renouvelables	24
L'eau-tech : procédé de pasteurisation solaire d'eaux de surface pour sites isolés. . .	25
Modélisation d'un système hybride PV–éolien–biogaz pour la transition énergétique des ZNI : île de San Andrés, Colombie	26
Techno-Economic Analysis of Gasification-Based Power Generation from Olive Tree Pruning in the kabylia Region.	27
Vers une optimisation technico-économique du Sea Water Air Conditioning (SWAC) : développement d'un outil d'aide à la décision pour la conception	28

Thème 4 29

4 Conception et optimisation des échangeurs de chaleur 29

Analyse d'un thermosiphon fermé diphasique utilisant de l'eau à pression subatmosphérique	30
Comparaison de la compacité d'échangeurs de chaleur dans le cadre d'un réacteur à sels fondus	31
Étude expérimentale et théorique d'un métamatériau concentrateur de chaleur	32
Étude préliminaire des transferts de masse et de chaleur lors de la vaporisation d'un écoulement d'eau à basse pression dans un canal étroit	33

Thème 5	35
5 Machines thermiques, pompes à chaleur, systèmes frigorifiques	35
Transferts thermo-fluidiques en écoulement alterné incompressible dans un canal ré-générateur - Analyse d'échelles et effet annulaire	36
Caractérisation expérimentale de deux éjecteurs pour un transformateur de chaleur à absorption NH ₃ -H ₂ O	37
Techno-economic and environmental assessment of an ammonia-water absorption refrigeration system driven by waste heat recovery for frozen warehouse	38
Thème 6	39
6 Mesures thermiques et méthodes inverses	39
Bayesian inference for the estimation of thermophysical properties of filamentous fungal colonies	40
Caractérisation thermophysique de dépôts surfaciques sur composant face au plasma : quelle modélisation thermique du couple dépôt-substrat ?	41
Détermination expérimentale de la résistance de contact entre des plaques et des ailettes en créneaux par méthode inverse	42
Identification des paramètres thermo-dépendants et anisotropes pour un isolant thermique par modèle réduit	43
Inférence bayésienne pour l'estimation simultanée des propriétés thermiques de matériaux orthotropes	44
Pyromètre trois couleurs pour la mesure de l'absorptivité des métaux liquides à la longueur d'onde de chauffage	45
Conception et mise en œuvre d'une soufflerie d'étalonnage à air chaud pour caractériser des écoulements par métrologies optiques	46
Imagerie 3D des champs de température au sein de polymères semi-transparentes	47
Iron Loss Evaluation via Infrared Thermography Imaging Using Thermal Inverse Methods	48
Mesure de débit dans un écoulement non-isotherme par inter-corrélation de signaux thermiques	49
Mesure de la conductivité thermique à température cryogénique	50
Mesure de la température de contact lors du soudage par point	51
Preuve de Concept : Monitoring et Optimisation du chauffage d'une structure de voie en béton d'un métro automatique en période hivernale	52
Thème 7	53
7 Méthodes numériques et modélisation en thermique	53
Analyse de sensibilité de différents cycles de Brayton	55

Comparaison d'un calcul CFD avec des tests expérimentaux afin de déterminer un modèle prédictif de globe noir en fonction de la charge solaire	56
Couplage conducto-radiatif de structures poreuses hétérogènes dans un maillage tétraédrique	57
Etude numérique de l'intégration de matériaux à changement de phase dans les parois des chambres froides pour le stockage des produits alimentaires	58
Evaluation de la dégradation d'un élément de drone par impact d'un faisceau laser . .	59
Évaluation thermo-énergétique d'un stockage actif à matériaux à changement de phase intégrant une modélisation adimensionnée	60
Méthode inverse pour l'estimation des propriétés thermiques d'une cellule cylindrique de batterie	61
Modélisation hydro-thermique d'un système géothermique : l'échangeur air-sol et le sol environnant	62
Modélisation macroscopique du comportement thermique d'un module de batterie de véhicules électriques	63
Simulation numérique directe des écoulements gas-particules dans les récepteurs solaires de tour à concentration	64
Une approche Monte Carlo pour l'analyse de sensibilité d'un système de pompe à chaleur automobile	65
Une approche pseudo-analytique basée sur la formulation « improved lumped » pour la reconstruction transitoire du flux thermique en écoulement dispersé sous conditions de type APRP	66
Une Nouvelle Stratégie de Refroidissement des Batteries Lithium-Ion par stockage de chaleur dans des Matériaux à Changement de Phase	67
3E analysis of PCM applied in building walls in the climatic conditions of Strasbourg .	68
A First-Principles Framework Based on Virtual Crystal Approximation for Calculating the Lattice Thermal Conductivity of Doped Si _{1-x} Ge _x Alloys	69
A novel model for ejector performance mapping across the full operating range	70
Assessment of CATHARE-3 3D module on TRIGA reactor	71
Etude de la validité d'un nouveau modèle théorique de prédiction de la conductivité thermique et de la viscosité pour des calculs CFD.	72
Étude et modélisation du transport des phonons dans les alliages par la méthode de Monte Carlo ; applications au calcul de la conductivité thermique du SiGe et l'InGaAs.	73
Méthode Monte Carlo par échantillonnage statistique de raies pour des estimations radiatives non biaisées dans les incendies	74
Towards Electrification of Biomass Pyrolysis in Fluidized Bed for Bioenergy Generation	75
Validité de la similitude de Froude pour un feu de cavité représentatif d'une façade ventilée - étude numérique	76

Thème 8 **77**

8 Phénomènes de changement de phase et écoulements multiphasiques **77**

Caractérisation dynamique d'un capteur de flux de chaleur micro-fabriquée	78
Caractérisation expérimentale d'écoulements bouillants intervenant dans les récepteurs solaires à Génération Directe de Vapeur	79
Détermination de la fonction de densité de probabilité de pulvérisation d'une buse à cône creux en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC)	80
Effet de la coalescence des gouttes sur la prédiction du flux thermique en Dispersed Flow Film Boiling	81
Etude du transfert de chaleur en régimes mouillants par ombroscopie et thermographie IR lors d'impacts de gouttes : effet de la mouillabilité de la surface	82
Étude expérimentale et numérique de la fusion de l'alliage Zamak (Zn-4Al) utilisé comme matériau à changement de phase (MCP) dans une enceinte fermée en acier inoxydable	83
Lors de la conception des nouveaux réacteurs, des dispositifs sont intégrés pour limiter la formation du corium et pour en assurer la gestion en cas d'accident grave.	84
Melting droplet on an inclined plane	85
Caractérisation thermo-structurale de paraffines commerciales : comparaison entre formes vrac et microencapsulées	86
Changement de phase : une cinétique assimilable à un essai de fluage ?	87
Comparative Study of Photovoltaic Cooling Techniques Under Identical Conditions	88
Étude de la stabilisation de l'ébullition convective par matrice de picots macroscopiques à l'aide de la thermométrie de luminophores bidimensionnelle	89
Étude des transferts de chaleur et de masse lors de l'évaporation d'une goutte sur une paroi : influence des propriétés du substrat	90
Étude et Modélisation Numérique du refroidissement par immersion en application aux packs batteries Lithium-ion	91
High-Temperature Phase Change Dispersions (PCDs) as Advanced Heat Transfer Fluids; Development and Characterisation	92
Refroidissement de composant électronique par immersion avec injections de bulles d'air.	93
Study of the Boiling Process in Electric Jet Boilers – Optimization of Equipment Durability Based on Experimental Data Analysis and Multiphysics CFD Process Modeling	94
Thermal convection and melting dynamics in a Phase Change Material (PCM) embedded in a porous solid foam	95
Vers la caractérisation des oscillations induites par changement de phase dans un tube capillaire	96

Thème 9 97

9 Phénomènes de combustion et étude des flammes 97

Analyse de performances de combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine classique	98
Dégradation thermique d'un câble électrique multiconducteur sous atmosphères inerte	99

Simulation prédictive de la combustion du fer en atmosphère d'oxygène pur, de l'allumage à la propagation.	100
Infrared Multispectral Emissivity Assessment of Materials Within a Combustion Chamber	101

Thème 10 103

10 Technologies de stockage de l'énergie thermique 103

Caractérisation de matériaux de stockage à chaleur latente par la thermodynamique des processus irréversibles	104
Matériaux composites céramiques recyclés intégrant un MCP pour la récupération de chaleur fatale industrielle	105
Numerical simulation of concrete based modular solid thermal energy storage system	106
Revue des systèmes de stockage thermique d'énergie appliqués aux enceintes d'AEC	107
Simulation des performances énergétiques d'un stockage souterrain à faible profondeur pour valoriser l'énergie solaire	108
Stockage électrothermique en chaleur latente par matrice conductrice issue des copeaux métalliques recyclés : vers une approche circulaire de la décarbonation de l'industrie.	109
Étude expérimentale et numérique d'un module de stockage thermique réversible pour réseaux urbains de chaud et de froid	110
Étude paramétrique d'un stockage d'énergie thermique à thermocline en lit fixe : effets du rapport d'aspect H/D et du niveau d'isolation	111
Numerical modeling of an open sorption heat storage reactor with a moving bed . . .	112

Thème 11 113

11 Thermique de l'habitat et adaptation au changement climatique 113

Caractérisation et modélisation du comportement thermique de panneaux biosourcés dérivés de résidus bois guyanais	114
Développement d'un modèle de Monte Carlo symbolique appliqué aux transferts thermiques dans les bâtiments	115
Prédiction des paramètres de modèles RC de bâtiments par réseaux de neurones à partir de caractéristiques simples du bâtiment.	116
Bâtiments de bureaux en climat sahélien : calibration énergétique et hiérarchisation des leviers passifs et actifs de décarbonation	117
Bio-Based Building Envelopes with Phase Change Materials : A Thermal Lever for Carbon Neutrality in Mediterranean Buildings	118
Évaluation des apports thermiques d'un bardage métallique perforé sur bâtiment résidentiel : approche numérique par méthodes de Monte-Carlo et validation expérimentale	119

Modélisation de la convection externe autour des structures éphémères - Construction d'un modèle compact pour la convection naturelle et la convection forcée	120
Modélisation Hygrothermique Multi-échelle	121
Towards High-Efficiency Greenhouse Design : Impacts of Argon-Filled Double Glazing on Climate Uniformity and Energy Consumption	122

Thème 12 **123**

12 Transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement **123**

Analyse expérimentale de la dynamique générée par un fort gradient de température volumique	124
Calcul précis et rapide du rayonnement thermique dans les gaz de combustion CO –H O pour les procédés industriels décarbonés	125
Développement auto-cohérent rapide des structures turbulentes dans les couches limites de convection naturelle à haute température	126
Étude de l'impact du vent sur la performance thermique et la capacité de collecte de rosée de condensateurs	127
Étude du risque d'endommagement des réseaux et équipements enfouis lors de feux de végétations	128
Mesure de la capacité thermique massique des métaux liquides par lévitation aéro-dynamique	129
Méthode fiable d'estimation de la conductivité thermique de différents nano-fluides . .	130
Mise en place d'un dispositif de thermographie rapide pour la caractérisation thermique d'électrodes en coupure sous vide	131
Premiers spectres d'émissivité du tungstène après exposition dans le tokamak WEST	132
Reconstruction précise du flux thermique lors de l'impact d'une goutte par thermographie IR sur substrat chauffé en saphir.	133
Un couplage spectroscopie-transfert radiatif en four industriel : une approche sans approximation physique ni réduction de la donnée	134
Capteur Solaire Aérothermique LOW TECH	135
Modélisation des effets de vieillissement d'échangeur céramique poreux pour la récupération de chaleur fatale	136
Preliminary study on the effect of Temperature on the Sedimentation Process of Particulate Matter : An experimental comparison between Newtonian and non-Newtonian Fluids.	137
Suspensions de mMCP pour la gestion thermique	138
Transferts thermiques conjugués en conduction-convection forcée établie : un quadripôle thermique pour une couche fluide en proche paroi	139

Thème 13 **141**

13 Transferts de masse et de chaleur en milieux poreux **141**

Conditions de formations de zones sèches dans un substrat capillaire pour le rafraîchissement adiabatique indirect.	142
Coupling of heat and mass transfers in bio-based construction materials	143
Effet de transport de gaz dans un milieu poreux induit par une différence de température	144
Vers un modèle thermo-hydrigue de sol pour application urbaine : développement numérique et premières confrontations à des mesures de terrain.	145
Analyse expérimentale des effets séparés de la mésostructure et du gaz interstitiel sur la conductivité thermique des milieux granulaires	146
Caractérisation de la contamination cationique dans les membranes échangeuses de protons par spectroscopie infrarouge.	147
Comportement hygro-thermique des isolants bio-sourcés : de la métrologie sans effets de bord aux effets de porosité, d'orientation de fibres et d'humidité	148
Étude de stockage de la chaleur fatale issue de procédés industriels à hautes températures en lit fluidisé	149
Étude expérimentale du transfert de chaleur par changement de phase dans un milieu poreux avec une configuration à ménisque inverse	150
Heat and Mass Transfer in a Capillary Porous Structure Infiltrated with Liquid Metal . .	151

Thème 14 **153**

14 Transferts thermiques à l'échelle micro et nanométrique **153**

Ébullition convective du CO ₂ dans un micro-canal : Prédiction des performances thermiques par apprentissage automatique	154
---	-----

Thème 15 **155**

15 Énergétique et optimisation des systèmes **155**

Développement d'un prototype de refroidissement de composants électroniques à haute densité de flux par immersion diphasique	156
Effet Joule in situ pour la régénération thermique des MOFs : étude du graphite et du composite MOF/graphite à basse tension (type PV)	157
Impact de différentes stratégies de contrôle d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé sur la consommation énergétique de ces espaces	158
Optimizing the carbon footprint of an offshore upstream asset by maximizing its energy efficiency : An integrated exergetic modeling approach	159
Adaptive fault detection in solar thermal for industrial processes based on conditional quantile regression	160
Caractérisation expérimentale de stratégies passives de démarrage à froid de piles à combustibles de type PEM.	161
Étude numérique et expérimentale des performances d'un séchoir solaire low-tech . .	162
Optimisation méta-heuristique en temps réel de la prévention de la surchauffe dans une centrale solaire thermique à capteurs plans	163

Performances de l'unique installation solaire thermodynamique française : la centrale
de 10 MWe ELLO 164

Index des auteurs 165

partie II

Résumé des communications

Thème 1

Applications thermiques dans l'industrie et décarbonation de l'industrie

Électrification des fours réverbères de refusion d'aluminium par torche plasma : enjeux thermiques sur un démonstrateur industriel	4
Optimisation du transfert thermique pour la décarbonation des procédés de liquéfaction du gaz naturel.	5
Analyse de l'écoulement d'air autour d'un cylindre en convection mixte	6
Caractérisation et optimisation avancées des transferts thermiques : couplage de capteurs intelligents, modélisation multi-physique et intelligence artificielle	7
Measurement, Modelling, Optimization on stainless steel annealing furnaces	8
Sizing of Supercritical Fluid Heat Transport Loop for Aircraft Propulsion	9

Électrification des fours réverbères de refusion d'aluminium par torche plasma : enjeux thermiques sur un démonstrateur industriel

Louis Piquard^{1,*}, Simon Vecten², Pierre Celle¹, Ali Shahverdi²

* ✉ : louis.piquard@constellium.com

¹ Constellium Technology Center (C-TEC), Voreppe, France

² PyroGenesis Inc., Montréal, QC, Canada

Mots clés : décarbonation, fours réverbères, aluminium, torche plasma, thermique, rendement énergétique, simulation numérique

Résumé :

Ce travail étudie l'électrification des fours réverbères d'aluminium par torche plasma à arc non transféré, dans le cadre du dimensionnement d'un démonstrateur industriel. Des simulations CFD stationnaires ont été réalisées pour analyser l'impact de la puissance injectée et du pouvoir fumigène sur les transferts thermiques et l'efficacité énergétique. Les résultats montrent une efficacité thermique supérieure au gaz naturel et une sélectivité accrue vers le métal, ouvrant des perspectives pour réduire le temps de fusion et optimiser les réglages lors des essais prévus en 2026.

Optimisation du transfert thermique pour la décarbonation des procédés de liquéfaction du gaz naturel.

Nicolas Rambure^{1,*}, Clément Rongier¹, Jean El Hajal²

* ✉ : nicolas.rambure@ten.com

¹ Technip Energies, 21-26 Boulevard de la Défense, 92000 Nanterre, France

² Wieland Werke AG, Thermal Solutions, Ulm, Germany

Mots clés : GNL, Ebullition, décarbonation

Résumé :

La décarbonation de l'industrie passe par une amélioration continue de l'efficacité énergétique des procédés thermiques. Dans le secteur du gaz naturel liquéfié (GNL), responsable d'une part importante des émissions industrielles, les étapes de pré-refroidissement et de liquéfaction représentent jusqu'à 35 % de la consommation énergétique totale des unités. Dans ce contexte, Technip Energies et Wieland Thermal Solutions ont développé et validé expérimentalement de nouvelles solutions d'échange thermique à haut rendement destinées aux évaporateurs de pré-refroidissement au propane. Ces innovations reposent sur l'utilisation de tubes à double surface d'échange améliorée (technologie GEWA-PB) et sur la conception optimisée d'un échangeur compact de nouvelle génération, le Smart Enhanced Chiller (S.E.C.). Les essais réalisés sur le banc KoMeT-1 ont permis de caractériser avec précision les phénomènes d'ébullition nucléée et de confirmer une amélioration notable du coefficient de transfert thermique, même à très faibles surchauffes. L'intégration de ces tubes dans les échangeurs industriels, couplée à une gestion optimisée des flux diphasiques par déflecteurs et séparateurs de gouttelettes, permet de réduire de 40 à 50 % la masse et le volume des équipements, tout en diminuant la consommation d'énergie de compression de 4 à 5 %. Les études de cas menées sur des unités GNL montrent qu'une réduction de l'approche en température de 3 K à 1 K conduit à des gains d'efficacité du cycle et à une baisse proportionnelle des émissions de CO₂, tant en phase d'exploitation, qu'en phase de fabrication des équipements. Ces travaux démontrent que l'optimisation thermique des échangeurs de chaleur, soutenue par une approche expérimentale et numérique intégrée, constitue un levier majeur pour la décarbonation des procédés industriels. Les principes développés dans le cadre du GNL sont transposables à d'autres filières énergétiques et chimiques où la maîtrise du transfert de chaleur conditionne la performance énergétique globale.

Analyse de l'écoulement d'air autour d'un cylindre en convection mixte

Katia Mroueh^{1,*}, Stéphane Roux, Yilin Fan¹, Jérôme Delmas¹, Vincent Sobotka¹

* ✉ : katia.mroueh-dit-injibar@etu.univ-nantes.fr

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : Thermique, Convection mixte, Ecoulement autour d'un cylindre,

Résumé :

La convection mixte, résultant de l'interaction entre écoulement forcé et flottabilité, influence fortement le refroidissement des systèmes électroniques. Sa prédiction reste complexe en raison du couplage non linéaire entre inertie et effets thermiques, ainsi que des transitions de régime associées. Ce travail vise à analyser les mécanismes gouvernant la convection mixte lorsque les deux contributions sont comparables. Une configuration simplifiée basée sur un cylindre chauffé est étudiée afin d'isoler les interactions entre sillage hydrodynamique et panache thermique. Une approche expérimentale est mise en œuvre : le cylindre est chauffé par cartouche interne et soumis à un écoulement d'air imposé. La température est mesurée par thermocouples et le champ de vitesse est obtenu par PIV. L'analyse s'appuie sur les nombres de Reynold Re , Grashof Gr et Richardson Ri (Gr/Re^2), les conditions couvrant un large domaine de Ri ($0.05 \leq Ri \leq 25$). Les résultats montrent une évolution de l'écoulement avec Ri . Pour Ri assez faible, le régime est dominé par la convection forcée et présente un sillage classique. Lorsque Ri augmente, un panache thermique dévié apparaît. Les interactions les plus intenses sont observées pour $Ri \approx 10$, caractérisées par une forte asymétrie du sillage, suggérant un décalage du régime de convection mixte par rapport aux critères classiques ($Ri \approx 1$). Des critères d'identification de régime basés sur les champs de vitesse sont proposés : l'analyse de la vorticité de l'écoulement révèle un renforcement des couches de cisaillement lorsque les effets de flottabilité deviennent significatifs tandis que l'énergie cinétique turbulente (TKE) met en évidence une augmentation des fluctuations dans le sillage, traduisant un couplage fort entre effets thermiques et hydrodynamiques. Les travaux en cours visent à affiner ces critères d'identification du régime et   le relier au coefficient de convection h puis d'exploiter ces résultats pour optimiser la géométrie.

Caractérisation et optimisation avancées des transferts thermiques : couplage de capteurs intelligents, modélisation multi-physique et intelligence artificielle

Florian Picard^{1,*}

* ✉ : florian.picard@improveheat.com

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

Mots clés : capteur, modélisation, IA

Résumé :

Les transferts thermiques, au cœur des systèmes énergétiques et des procédés industriels, font face à des défis croissants liés à la complexité multi-échelle (du nanomètre au système industriel), à la diversité des milieux (hétérogènes, diphasiques, poreux) et à la dynamique des phénomènes (régimes transitoires, couplages multi-physiques). Les méthodes classiques - mesures locales et modèles analytiques ou numériques simplifiés - peinent à capturer ces phénomènes avec la précision nécessaire pour en optimiser la performance énergétique, la fiabilité et l'impact environnemental. Pourtant, une compréhension fine et objectivée des transferts de chaleur est essentielle pour répondre aux enjeux de la transition énergétique, de la durabilité des systèmes et de l'efficacité des procédés. La technologie improveheat, startup issue du CEA, propose une approche intégrée combinant à la fois des capteurs innovants pour acquérir des données locales en temps réel (profils de température de paroi et de fluide, flux thermique, coefficient de transfert thermique), une modélisation multiphysique avancée pour détecter des phénomènes critiques (changement de phase, encrassement, vieillissement, instabilités), en régimes transitoires, de l'intelligence artificielle, pour analyser des phénomènes multiphysique, construire des champs thermiques, prédire des comportements non linéaires et optimiser des stratégies de contrôle (ex. : régulation dynamique des flux, minimisation des pertes exergétiques).

Measurement, Modelling, Optimization on stainless steel annealing furnaces

Marcello Bentivegni^{1,*}, Dorian Hachet¹, Joppe Schildermans¹

* ✉ : marcello.bentivegni@aperam.com

¹ Aperam Stainless France, Isbergues, France

Mots clés : stainless steel, annealing, optimization, modelling, thermal measurement, grain growth

Résumé :

In steel industry the first scope 1 & 2 energy consumer/emitter in downstream** processes are the annealing or heat treatment furnaces. The technology used is mostly natural gas burning, with an average of 60/65% efficiency ; roughly one third of the energy is left at the chimney. In the global decarbonation strategy of Aperam, actions on heating technologies are completed by capex-free optimization actions that target energy consumption decrease at product equivalent quality. Compared to extensive capex usage actions, these optimization activities have the advantage of delivering quick actions and quick wins. **Downstream = all the processes out of the steelmaking part ; for Aperam the processes starting from hot rolling to the final coil state manufacturing

Sizing of Supercritical Fluid Heat Transport Loop for Aircraft Propulsion

Ramit Rakesh^{1,2,*}, Abdelhamid Kheiri², Nicolas Blet², Benjamin Remy², Olivier Verseux¹

* ✉ : ramit.rakesh@univ-lorraine.fr

¹ AIRBUS OPERATIONS

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

Mots clés : Supercritical Fluid, Waste Heat Recovery Loop, Aircraft Propulsion, Supercritical Carbon Dioxide

Résumé :

The Aviation sector today accounts for 2.5% of all global CO₂ emissions per annum, and in the past two decades has outgrown every other major mode of transport. While significant gains in efficiency have been made year on year, the growth in air travel has outpaced these gains. In order to fulfill Net Zero carbon emissions targets by 2050, industry stakeholders would have to invest in novel technologies with the ability to cause disruptive change and be widely applicable across different aircraft types. The reduction in emissions from Aircraft Engines has been largely driven by reduced fuel burn and other CO₂ emissions. This increase in fuel efficiency however has come at a cost of needing to have higher temperatures and pressures, leading to an increase in NO_x emissions. Despite the best efforts of Aircraft Engine manufacturers, thermal efficiency of modern Aircraft Engines is still around 50%, and rate of improvements per annum is dropping, thus making further gains a challenge in current Turbofan Aircraft Engine architecture. Core exhaust losses are one of the two major losses in large Aircraft Engines where significant gains could be made via intercooling and recuperation of exhaust heat. Supercritical Fluids beyond critical point exhibit properties of both liquids and gases, which could be exploited to increase the energy density and heat capacity, while also improving flow and heat transfer of working fluids. Supercritical CO₂ (sCO₂) Brayton Cycles are known to be stable, compact, less complex, have lower cost and efficient thermodynamically. While using sCO₂ as a working fluid for core exhaust heat recovery reaps benefits it also poses significant challenges : The complex behavior of sCO₂ and its properties near the critical point, arising instabilities, associated pressure losses which are serious concerns for practical applications. There exists limited research into sCO₂ loops for Aerospace applications, the methodical sizing of a closed supercritical loop and its components is also lacking. Through this work a methodology to size a sCO₂ closed loop pertaining to Aircraft Propulsion waste heat recovery would be established through modeling. The model would act as a foundation to sizing of a sCO₂ loop and its associated components, which would help establish a physical test bench to validate the model and further the understanding of sCO₂ behavior and prospective application on Aircraft Engines.

Thème 2

Applications thermiques dans le domaine du vivant

Estimation d'une source de chaleur dans un milieu biologique sur la base d'un modèle d'apprentissage informé par la physique	12
Identification d'un modèle d'état réduit et de l'entrée thermique inconnue pour la reconstruction 3D du champ de température en thermoablation	13
Étude de l'échauffement d'implants médicaux soumis à des champs magnétiques basses fréquences.	14

Estimation d'une source de chaleur dans un milieu biologique sur la base d'un modèle d'apprentissage informé par la physique

Jean-Luc Battaglia^{1,*}, Nino Avetikovi^{1,2}, Ida Burgers¹, Mariana De Melo Antunes^{1,3}, Valery Ozenne²

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

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

² Univ. Bordeaux, CNRS, CRMSB, UMR 5536, F-33000 Bordeaux, France

³ Université d'Itajubá, Laboratoire de Transfert de Chaleur (LabTC), Itajubá, MG, Brésil

Mots clés : thermoablation, MRI thermometry, heat source, inverse methods, physical informed neural network

Résumé :

Le traitement de tumeurs cancéreuses par thermoablation consiste à générer une source de chaleur au sein de la tumeur afin de conduire à sa coagulation par l'augmentation de température. Ce processus est efficace dans de nombreuses configurations. Il peut même être qualifié d'optimal si l'élévation de température est contrôlée et si le domaine traité reste bien circonscrit à la tumeur. Dans ce but, la thermométrie IRM est mise en œuvre durant le procédé pour mesurer le champ de température 3D en régime transitoire. Ce sont déjà des progrès immenses et qui peuvent encore être poursuivis. En effet, la mesure par thermométrie comporte des artefacts résultant principalement des interactions entre le dispositif servant à la génération de la source de chaleur et le champ magnétique de l'IRM. Ceci conduit à avoir une mesure bruitée et incomplète. D'autre part, la thermométrie IRM repose sur la définition d'un réseau de voxels et c'est la température moyenne par voxel qui est renseignée par la mesure. Les voxels étant de taille millimétrique, cette moyenne masque des variations importantes du gradient de température à proximité immédiate du dispositif générateur de source et conduit à sous estimer les températures maximales atteinte au cours du temps. Ceci nous a conduit à proposer un modèle du processus de diffusion de la chaleur dans les tissus de la zone traitée au cours du temps afin de renseigner les données manquantes et de mieux décrire les gradients thermiques. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire d'identifier la source de chaleur en termes d'amplitude et de répartition spatiale. C'est un problème inverse classique basé sur les mesures par thermométrie. Cette source identifiée est alors utilisée pour recalculer le champ de température. Cette approche peut être abordée de différentes manières dont certaines font l'objet de présentations à ce congrès ou bien dans des publications. L'approche que nous proposons ici est différente. Elle est basée sur le fait que de plus en plus de mesures sont disponibles aujourd'hui en thermoablation assistée par thermométrie IRM. Cette base de donnée peut servir alors pour conduire l'apprentissage d'un réseau de neurones profond informé par la physique. C'est l'objet de la présente communication. Nous proposons de décrire la méthodologie développée sur la base de simulations du transfert thermique dans des milieux biologiques 3D réalistes intégrant notamment un réseau vasculaire complexe. Le réseau de neurones est classique et nous rajoutons des conditions portant sur la validité de l'équation de la chaleur avec source ainsi que sur les conditions aux limites (plus particulièrement la température au sein des vaisseaux sanguins). Les fonctions de minimisation sur le réseau et sur la physique sont pondérées par des coefficients dont la valeur est recherchée au sens de l'optimalité. L'apprentissage est réalisé sur une vingtaine de configurations différentes puis validé sur des configurations différentes.

Identification d'un modèle d'état réduit et de l'entrée thermique inconnue pour la reconstruction 3D du champ de température en thermoablation

Mariana De Melo Antunes^{1,2,*}, Jean-Luc Battaglia¹, Ida Burgers¹, Nino Avetikovi^{1,3}, Valery Ozenne³, Sandro M. M. De Lima E Silva²

* ✉ : mariana.de-melo-antunes@u-bordeaux.fr

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

² Université d'Itajubá, Laboratoire de Transfert de Chaleur (LabTC), Itajubá, MG, Brésil

³ Univ. Bordeaux, CNRS, CRMSB, UMR 5536, F-33000 Bordeaux, France

Mots clés : Modèle réduit, Identification par sous-espace, Ablation thermique, Thermométrie IRM, Modélisation basée sur les données

Résumé :

Objectifs : L'ablation thermique détruit les tissus tumoraux en élevant leur température, et son efficacité dépend de la prédiction précise du champ thermique afin de traiter complètement la zone cible tout en préservant les structures saines. La thermométrie par résonance magnétique (MRT), bien que largement utilisée pour le suivi thermique en temps réel, souffre d'artefacts, de bruit et de zones où le signal est manquant ou peu fiable, ce qui limite la visualisation du champ thermique 3D. Par ailleurs, les modèles thermiques numériques sont coûteux, difficiles à intégrer à l'imagerie et ne disposent pas toujours des paramètres nécessaires, notamment la puissance appliquée. L'objectif de ce travail est donc de proposer une méthode capable de reconstruire le champ thermique tridimensionnel tout en estimant simultanément la source de chaleur, à partir des mesures MRT. **Méthodes :** Nous développons un cadre de modélisation réduite basé sur une représentation en espace d'état identifiée directement à partir des données. Une base modale est extraite par décomposition orthogonale propre (POD) appliquée aux champs de température expérimentaux issus de la MRT, permettant de réduire la dimensionnalité tout en conservant les structures spatiales dominantes. À partir de cette base, un modèle discret d'ordre réduit est identifié en estimant simultanément la matrice dynamique et une entrée thermique inconnue via une procédure d'optimisation alternée combinant régression aux moindres carrés et inversion régularisée. Cette identification ne repose sur aucune contrainte physique explicite, ce qui confère au modèle une grande flexibilité, mais limite l'interprétation physique directe des opérateurs identifiés et peut renforcer la dépendance aux données disponibles. **Résultats :** Le modèle d'ordre réduit reproduit avec une bonne précision l'évolution spatio-temporelle du champ thermique expérimental pour un coût de calcul très faible. Il capture les modes thermiques dominants et la géométrie macroscopique de l'ablation. L'entrée thermique estimée reste cohérente avec le protocole expérimental et restitue les principales phases de chauffage. La dynamique identifiée est principalement descriptive et dépendante du domaine d'apprentissage, ce qui restreint les capacités d'extrapolation. L'absence de contraintes physiques explicites complique l'interprétation des opérateurs réduits et peut conduire l'entrée estimée à absorber des effets non modélisés ou du bruit. Malgré ces limites, ces résultats constituent une preuve de concept démontrant que l'ensemble des paramètres du modèle réduit peut être estimé simultanément à partir de données expérimentales seules. Cette approche ouvre la voie à des améliorations futures, notamment l'intégration de contraintes physiques, tout en conservant un temps de calcul compatible avec une utilisation quasi temps réel.

Étude de l'échauffement d'implants médicaux soumis à des champs magnétiques basses fréquences.

Lucien Hammen^{1,*}, Baptiste Ristagno¹, Annick Tchiacheu Kadjo¹

* ✉ : lucien.hammen@inrs.fr

¹ Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Vandœuvre-lès-Nancy, France

Mots clés : Implant, induction

Résumé :

Contexte et objectifs : Les progrès de la médecine ont permis de développer et de démocratiser une large gamme de dispositifs médicaux implantables. Ces dispositifs sont majoritairement métalliques et sont donc susceptibles d'interagir avec les champs électromagnétiques environnants, notamment de s'échauffer par induction. L'objectif de cette étude est de proposer une méthodologie de caractérisation de l'échauffement d'implants métalliques soumis à des champs magnétiques basses fréquences représentatifs de certains environnements industriels. **Méthode :** L'étude combine modélisation et expérimentation. D'un point de vue théorique, l'échauffement résulte du couplage entre les équations de l'électromagnétisme et celles de la thermique. Le courant induit au sein de la prothèse par la variation temporelle du champ magnétique, conformément à la loi de Maxwell-Faraday, va générer par effet Joule une puissance thermique. La dissipation de cette énergie d'origine électromagnétique dans les tissus avoisinants est décrite par l'équation de Pennes. Pour faciliter la comparaison à l'expérimentation, nous avons considéré un cas simplifié : pas de dissipation due à la perfusion sanguine et absence de chaleur métabolique. La résolution numérique a été réalisée par la méthode des éléments finis. D'un point de vue expérimental, nous avons considéré un disque de cuivre ($\varnothing = 94$ mm, épaisseur = 0,3 mm) pour représenter une prothèse. Une telle géométrie permet de calculer analytiquement la puissance thermique. Pour s'affranchir des effets de convection de l'air, et se rapprocher des conditions réelles d'implantation, le disque est placé au sein d'un isolant thermique. Pour ce faire, avons utilisé un gel d'huile (SEBS). La caractérisation des propriétés thermiques de ce dernier a été réalisée par la méthode du plan chaud semi-infini et par identification entre mesures et simulations. Pour échauffer l'implant nous avons positionné celui-ci au centre d'un solénoïde, de façon à maximiser le flux magnétique à travers le disque. Le champ magnétique incident, de fréquence 25 kHz, est appliqué avec une intensité de 0,6 mT crête pendant 15 minutes. L'échauffement est mesuré au niveau du disque à l'aide de sondes de température optiques offrant une insensibilité aux perturbations électromagnétiques. **Résultats :** L'élévation de température mesuré dans les conditions décrites ci-dessus, montre un échauffement de 1,8 degC par rapport à la température ambiante. L'évolution de la température simulée suit la courbe expérimentale dans son intervalle de confiance. **Conclusion et perspectives :** La bonne adéquation entre les simulations numériques et l'expérimentation, permet de conclure que les modèles numériques utilisés sont suffisamment prédictifs pour estimer l'échauffement d'implant dans des situations plus complexes. En effet les travaux présentés ici constituent la première étape vers une étude plus complète visant à estimer le risque d'échauffement pour les travailleurs implantés.

Thème 3

Applications thermiques des énergies renouvelables

Analyse des Performances Thermoélectriques d'un Capteur Solaire Hybride PV/T à Air : Influence du Nombre d'Ailettes et de la Vitesse d'écoulement	16
Concept de rareté thermodynamique des ressources pour la sélection de procédés de production de chaleur décarbonée	17
Évaluation à l'échelle système de composants innovants pour les collecteurs cylindro-paraboliques	18
Modélisation semi-analytique d'un revêtement sélectif plasmoniques pour le solaire thermique	19
SHIP4D : La chaleur solaire pour la décarbonation des processus industriels	20
Analyse du potentiel thermohydraulique des stations de relevage post-minières dans le bassin minier des Hauts-de-France	21
Bio-2,3-butanediol production from banana waste : Preliminary techno-economic evaluation of processing strategies	22
Etude de la production de granulats à partir du frittage de sable sous flux solaire concentré . . .	23
Évaluation globale des impacts environnementaux, sociaux et économiques : étude comparative d'énergies renouvelables et non renouvelables	24
L'eau-tech : procédé de pasteurisation solaire d'eaux de surface pour sites isolés.	25
Modélisation d'un système hybride PV-éolien-biogaz pour la transition énergétique des ZNI : île de San Andrés, Colombie	26
Techno-Economic Analysis of Gasification-Based Power Generation from Olive Tree Pruning in the kabylia Region.	27
Vers une optimisation technico-économique du Sea Water Air Conditioning (SWAC) : développement d'un outil d'aide à la décision pour la conception	28

Analyse des Performances Thermoélectriques d'un Capteur Solaire Hybride PV/T à Air : Influence du Nombre d'Ailettes et de la Vitesse d'écoulement

Ranim Beji^{1,*}, Jian Lin², Monica Siroux², Hatem Oueslati¹

* ✉ : ranymbeji8@gmail.com

¹ Laboratoire des Procédés Thermiques – Centre de Recherches et Technologies de l'Énergie

² Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357

Mots clés : énergie renouvelable; énergie solaire; efficacité énergétique, photovoltaïque-thermique

Résumé :

Cette étude a pour objectif d'optimiser les performances thermoélectriques des capteurs solaires hybrides photovoltaïques/thermiques (PV/T) à air. Elle analyse l'influence du nombre d'ailettes et de la vitesse du fluide caloporteur sur le refroidissement des cellules photovoltaïques et sur la récupération de l'énergie thermique. Un modèle mathématique basé sur des équations différentielles ordinaires (ODE) a été développé afin de décrire les phénomènes couplés de transfert thermique, massique et électrique au sein du capteur. Les simulations ont été réalisées sous Matlab, et le modèle a été validé expérimentalement sur un capteur PV/T à air à absorbeur à ailettes, conçu et instrumenté localement au Laboratoire des Procédés Thermiques du Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie (CRTE) à Borj Cédria en Tunisie. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du nombre d'ailettes de 24 à 108 améliore significativement la puissance thermique récupérée, passant de 450 W à 650 W (gain de 44 %), ainsi que le rendement thermique, qui s'élève de 40 % à 60 %. De plus, le doublement de la vitesse de l'air (de 2 à 4 m/s) entraîne une augmentation de la puissance thermique de 56 % et du rendement thermique de 40 % à 54 %. Le rendement électrique varie entre 12 % (à midi) et 16 % (le matin et le soir). La présence d'ailettes, combinée à un écoulement d'air, ne dégrade donc pas les performances électriques. La température des cellules photovoltaïques diminue de 73 °C à 70 °C lorsque le nombre d'ailettes augmente et de 71 °C à 65 °C lorsque la vitesse de l'air est doublée. Enfin, la validation expérimentale du modèle numérique a montré une excellente concordance avec les résultats simulés, avec des écarts inférieurs à 5 %. Ces résultats ouvrent la voie à une optimisation prédictive des performances du capteur PV/T par des approches basées sur les réseaux de neurones.

Concept de rareté thermodynamique des ressources pour la sélection de procédés de production de chaleur décarbonée

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

* ✉ : olives@univ-perp.fr

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

Mots clés : chaleur décarbonée, rareté thermodynamique, ressources matérielles, matériaux critiques

Résumé :

Les technologies à énergie renouvelable se révèlent pertinentes pour la réduction des émissions de CO₂ et pour l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique. Néanmoins, le fait de passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables se traduit par le remplacement des matières premières énergétiques (charbon, pétrole, gaz) par des matières premières non énergétiques (matières minérales et organiques). Autrement dit, moins gourmands en énergie fossile, ces procédés exigent de mobiliser davantage de matériaux pour leur fabrication (Vidal, 2018). Il devient nécessaire de rajouter à l'analyse de cycle de vie (ACV), la notion de rareté thermodynamique qui consiste à donner aux matériaux une valeur thermodynamique, dépendant de leur concentration et de leur abondance dans la croûte terrestre. Un indicateur de rareté thermodynamique a été introduit par Valero et al. (2015) en se basant sur l'exergie, d'une part, nécessaire pour l'extraction et le raffinage des matériaux et, d'autre part, liée à la concentration des minerais dans les mines actuelles. Afin d'illustrer le propos, nous appliquons ce concept à la comparaison entre plusieurs systèmes de production d'eau chaude sanitaire à partir d'énergie solaire. Ainsi, nous comparons un chauffe-eau solaire thermique avec un cumulus électrique ou un chauffe-eau thermodynamique alimenté par des panneaux photovoltaïques (PV). Outre les indicateurs utilisés dans l'analyse de cycle de vie tels que la demande en énergie cumulée, le contenu CO₂ et la quantité de matériaux mobilisés, nous y associons la valeur thermodynamique de ces matériaux en intégrant cet indicateur de rareté thermodynamique. Nous montrons ainsi que le chauffe-eau solaire thermique est, pour l'ensemble des critères, plus intéressant même si au regard des indicateurs de l'ACV, son intérêt peut être discuté selon le lieu où il se situe. Par contre, le chauffe-eau solaire thermique s'avère nettement plus pertinent que les systèmes alimentés par du PV au regard de l'indicateur de rareté thermodynamique. Cet indicateur met en évidence les matériaux dont les ressources peuvent être très limitées et donc en faible abondance sur Terre. Il contribue ainsi à une meilleure évaluation de l'utilisation des ressources naturelles à laquelle sont associés généralement les risques d'approvisionnement. À cet indicateur, il s'agira ensuite d'y adjoindre l'intérêt économique de ces matériaux pour consolider la notion de criticité qui reste encore actuellement relativement floue et imprécise. L'objectif de cette approche est de compléter l'ACV pour fournir un outil d'aide à la sélection des procédés de production de chaleur décarbonée.

Évaluation à l'échelle système de composants innovants pour les collecteurs cylindro-paraboliques

Clara Douillard^{1,*}, Marianne Biéron¹

* ✉ : clara.douillard@etu.imt-nord-europe.fr

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

Mots clés : Collecteurs cylindro-paraboliques, solaire thermique, modelica, modélisation et simulation numérique, énergies renouvelables, énergétique des systèmes

Résumé :

La chaleur représente 45% de l'énergie finale consommée en France. Elle est aujourd'hui produite à 60% par des énergies fossiles. Face à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre du mix énergétique et de diversifier les sources d'énergie, le développement et l'amélioration des technologies solaires thermiques est stratégique. Cet article s'intéressera en particulier aux collecteurs solaires cylindro-paraboliques (PTC). De nombreux travaux scientifiques cherchent à améliorer leurs performances en développant de nouveaux fluides, de nouvelles géométries de tubes ou encore de nouveaux revêtements de tubes. Ces recherches, réalisées souvent à une échelle composant, permettent difficilement d'évaluer l'impact de ces améliorations à l'échelle d'une installation industrielle. L'objectif de cette étude a donc été d'évaluer les performances de ces collecteurs à l'aide de la simulation à l'échelle système pour différents types d'améliorations (géométrie, revêtement du tube absorbeur et huile thermique). Pour cette étude, le logiciel de simulation système Dymola, basé sur le langage Modelica, a été utilisé afin de créer une bibliothèque de composants permettant de modéliser les différents composants des collecteurs PTC et leurs améliorations. La conception s'est appuyée sur la Modelica Standard Library, les travaux existants sur Modelica pour les collecteurs PTC et a été adaptée du modèle de Forristal. Dans un premier temps, à partir de modèles de transferts thermiques théoriques de la littérature, un collecteur, des fluides caloporteurs ainsi qu'un tube simplifié ont été modélisés afin de pouvoir facilement ajouter les améliorations géométriques. Une fois les différents composants développés, il a été nécessaire de vérifier la cohérence des résultats obtenus par simulation en les validant à l'aide de données expérimentales. Enfin, plusieurs simulations en conditions réelles avec différentes géométries ont été effectuées afin de comparer les améliorations par rapport au collecteur « classique ». Pour cela, un système intégrant des collecteurs cylindro-paraboliques, un échangeur et une pompe de circulation, permettant de faire monter en température de l'eau a été modélisé afin de par la suite les intégrer à des systèmes complets pour la production d'électricité (eau à 400degC) ou l'alimentation d'un réseau de chaleur urbain (eau à 80degC). Ces travaux ont ainsi permis de créer une bibliothèque Modelica fonctionnelle, facilement modifiable selon les améliorations que l'on cherche à étudier. Les différents composants validés permettent de simuler correctement des systèmes complexes. Grâce aux premières simulations, il est possible d'évaluer l'impact des améliorations sur la production de chaleur dans un lieu défini (Calais) sur une période donnée et pour température de consigne pour l'eau chaude produite définie. Une étude de sensibilité a aussi été menée pour déterminer les paramètres influençant le plus le système.

Modélisation semi-analytique d'un revêtement sélectif plasmoniques pour le solaire thermique

Aimad Koulali^{1,*}, Serge Russeil¹

* ✉ : aimad.koulali@imt-nord-europe.fr

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

Mots clés : solaire thermique, revêtements sélectifs, plasmonique ; nanocermets, milieux effectifs, Effet de taille

Résumé :

L'énergie solaire thermique offre une voie intéressante pour produire une chaleur durable, à condition d'optimiser l'absorption du rayonnement et de limiter les pertes radiatives au niveau de l'absorbeur. Dans cette perspective, nous visons la conception de revêtements sélectifs dopés en nanoparticules plasmoniques capables de combiner une forte absorbance dans le spectre solaire, une approche qui a fait ses preuves pour les cermets métal-diélectrique et qui est pertinente pour les applications à haute température. L'objectif de ce travail est de développer un code de calcul semi-analytique, rapide et interprétable, qui prédit les propriétés optiques et radiatives de tels revêtements. L'approche couple une stratégie de milieu effectif hybride (combinant Maxwell-Garnett et Bruggeman) intégrant les effets de taille nanométriques pour les couches composites, et un formalisme de propagation en couches minces (TMM) pour estimer réflectance, transmittance et absorptance spectrales. Les hypothèses de départ portent sur des couches planes et isotropes, couvrant une large gamme de fractions volumiques, une incidence normale et un substrat traité comme semi-infini. Le plan de validation s'appuie d'abord sur un échantillon "sandwich" alumine-cermet-alumine déposé sur silicium, dont les courbes d'absorptance mesurées expérimentalement servent de référence pour calibrer le modèle.

SHIP4D : La chaleur solaire pour la décarbonation des processus industriels

Simon Caron^{1,*}, Valéry Vuillerme¹

* ✉ : simon.caron@cea.fr

¹ CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

Mots clés : Décarbonation, Chaleur des procédés industriels, Energie solaire

Résumé :

Objectifs Selon l'AIE, le secteur industriel représente 20% de la consommation finale énergétique française et génère 14% des émissions de CO₂. Plus de 70% de cette énergie est consommée sous forme de chaleur. 50% de cette chaleur requiert une température inférieure à 400degC. Aujourd'hui, cette énergie thermique est principalement fournie par des combustibles fossiles, notamment le gaz naturel. Plusieurs axes de décarbonation sont envisagés dans les plans de transitions sectoriels présentés par l'ADEME à l'horizon 2050 : i) la sobriété et l'efficacité énergétique, ii) l'électrification des procédés, iii) l'intégration intelligente des énergies renouvelables et du stockage d'énergie. Le projet SHIP4D, dans le cadre du PEPR SPLEEN, étudie la contribution de la chaleur solaire dans la décarbonation des processus industriels, en particulier pour la gamme de température 150-400degC. Méthodes Une architecture est définie pour le dimensionnement optimal d'un système énergétique hybride, intégrant différentes briques technologiques : i) énergie solaire (photovoltaïque (PV), solaire thermique à concentration (CST)), ii) stockage (électrique ou thermique), iii) conversion de l'électricité en chaleur (chaudière électrique, pompe à chaleur) et iv) une chaudière auxiliaire (gaz naturel, biogaz, biomasse). Le logiciel CAIRN, développé par le CEA LITEN, permet d'analyser ce système d'un point de vue techno-économique et environnemental. Le problème d'optimisation du dimensionnement du système et de sa stratégie de contrôle est résolu en appliquant la programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP). La fonction de coût prend en compte la valeur actuelle nette (VAN) du système et peut inclure diverses contraintes définies par l'utilisateur, telles que l'empreinte foncière ou l'empreinte carbone. L'étude de cas est réalisée pour trois localisations différentes en France, i.e. Rouen, Chambéry et Montpellier. La demande en chaleur considérée est un talon de consommation de 1 MWth, 24/7, soit 8760 MWh pour une année. On fait l'hypothèse que le procédé industriel opère de 150 à 250degC. Résultats L'étude de cas démontre que la chaleur solaire représente une option de décarbonation viable pour une température de procédé industriel jusqu'à 250degC, susceptible d'apporter des bénéfices économiques et environnementaux tangibles pour l'industrie française. En l'absence de mécanismes incitatifs, l'électrification directe reste non compétitive en raison du coût élevé de l'électricité en comparaison au gaz naturel. Améliorer l'efficacité d'une chaudière à gaz est une mesure de décarbonation rentable. Substituer le gaz naturel par le biogaz ou la biomasse est aussi une mesure de décarbonation attractive, malgré le surcoût énergétique. Une hybridation avec le solaire thermique à concentration semble plus attractive que le photovoltaïque, tandis que le stockage thermique est préféré au stockage électrique pour atteindre des économies d'énergie supérieures à 20%.

Analyse du potentiel thermohydraulique des stations de relevage post-minières dans le bassin minier des Hauts-de-France

Souria Hamidouche^{1,*}, Saad Eloirdi¹, Olivier Louart²

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

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

² STRATEGEO Conseil & EGEE Développement, France

Mots clés : Chaleur fatale, Station de relevage, valorisation

Résumé :

Dans un contexte de transition énergétique, renforcé par les engagements européens et la trajectoire nationale de neutralité carbone, les politiques publiques encouragent le recours à des énergies renouvelables et de récupération (ENR&R). En France, la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte et la Stratégie Nationale Bas-Carbone mettent en avant la valorisation des gisements thermiques issus des infrastructures hydrauliques urbaines, dont la disponibilité annuelle constitue un atout majeur [1]. Les retours d'expérience suisses et allemands démontrent depuis plus de vingt ans la faisabilité et l'intérêt opérationnel de la récupération de chaleur sur eaux usées, aujourd'hui reconnue comme un gisement local bas carbone structurant pour l'aménagement territorial [2]. En France, cette approche se renforce, notamment avec la cartographie du potentiel de chaleur fatale réalisée en Seine-Saint-Denis pour orienter les projets de décarbonation [3]. Par ailleurs, des travaux récents montrent que les infrastructures post-industrielles, telles que les mines inondées ou les eaux d'affaissement, constituent des réservoirs thermiques capables d'alimenter des pompes à chaleur à haut rendement. Ces études indiquent qu'une part significative des besoins thermiques peut être couverte grâce à ces systèmes, tout en offrant des performances saisonnières élevées et une intégration favorable aux stratégies territoriales de transition énergétique [4]. De plus, une étude récente fondée sur des simulations multi-annuelles menées sur un site minier abandonné a montré qu'il est possible de couvrir jusqu'à 77 % des besoins des serres agricoles avec une chaleur entièrement décarbonée [5]. La présente étude examine le potentiel thermohydraulique d'une station de relevage située dans le bassin minier des Hauts-de-France. L'approche repose sur l'analyse conjointe des données issues des campagnes de terrain, incluant les débits et les températures de l'eau refoulée afin d'estimer la puissance thermique mobilisable en conditions réelles de fonctionnement. Bien que conçues initialement pour assurer la protection hydraulique du territoire et prévenir les risques d'inondation, ces stations ont un potentiel permettant une valorisation locale de chaleur décarbonée. Références : [1] Delaleux, F., et al., (2022). Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration. SFT, Valenciennes, France. [2] Bühler, T. (2008). Récupération de la chaleur des eaux usées : retour d'expériences faites en Suisse et en Allemagne. GWA, 5, 379-384. [3] Petrucci, G., et al., (2020). Cartographier le potentiel de récupération de chaleur des eaux usées : l'exemple de la Seine-Saint-Denis. TSM, (1-2), 63-70. [4] Faramarzpour, H., et al., (2025). A novel systematic heat integration and heat recovery approach for reactivating abandoned mines to meet energy demand of greenhouses - Application of dynamic pinch analysis. Energy and Buildings, 337, 115678. [5] Ce

Bio-2,3-butanediol production from banana waste : Preliminary techno-economic evaluation of processing strategies

Mercedes Rodriguez Sarmiento^{1,*}, Juan López Linares

* ✉ : mercedesrodriguez12@hotmail.com

¹ Institución Universitaria de Barranquilla

Mots clés : 2,3-Butanediol, banana waste

Résumé :

This study evaluates different fermentation strategies to produce 2,3-butanediol (2,3-BD) from banana industry waste, such as whole bananas (fruit + peels) and banana peels, selecting the most favorable from a technical and economic point of view. Both residues have enough free sugars (17.8 %-35.8 %), glucan (11.0 %-14.2 %) and hemicellulose (2.8 %-6.3 %), to be promising substrates for 2,3-BD fermentation. Saccharification was studied by comparing enzymatic hydrolysis, hydrothermal pretreatment, and hydrothermal pretreatment followed by enzymatic hydrolysis. Different fermentation scenarios were also compared regarding the 2,3-BD yield and productivity : Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF), Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF), and direct fermentation without prior saccharification using *Paenibacillus polymyxa* DSM-365 as the fermenting microorganism. The results showed that the pretreatment step was not necessary to improve the release of fermentable sugars. Enzymatic hydrolysis was the most effective alternative for maximizing sugar recovery, reaching sugar concentrations of 18.1 g/L (recovery : 92.5 %) for banana peels and 33.3 g/L (recovery : ~100 %) for whole bananas. The SSF strategy led to higher 2,3-BD concentrations of 15.0 g/L and 26.6 g/L for banana peels and whole bananas, respectively. The preliminary economic analysis indicated that SSF and direct fermentation could be the more cost-effective process alternatives for banana peels and whole bananas, respectively. Thus, it was demonstrated that banana waste is an interesting resource for the production of 2,3-BD. The bioprocess can be competitive when using a low-cost raw material and reducing the number of process steps compared to traditional technologies.

Etude de la production de granulats à partir du frittage de sable sous flux solaire concentré

Tangui Cornec^{1,2,*}, Quentin Falcoz², Christophe Escape, Christophe Arnoult, Baptiste Charpantier, Julien Ngo, Baptiste Charpantier

* ✉ : tangui.cornec@gmail.com

¹ Arts et Métiers, ENSAM, Paris, France

² CNRS-PROMES (UPR 8521), Technosud-Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66100 Perpignan

Mots clés : énergie solaire, frittage

Résumé :

Aujourd'hui, les matériaux de constructions tels que les granulats sont inégalement répartis sur la planète. Des pays comme l'Algérie sont obligés d'en importer des dizaines de milliers de tonnes chaque année. Ces importations à elles seules génèrent des dizaines de tonnes de CO₂eq émises par le transport de ces matériaux. L'objectif de cette étude, réalisée avec un partenariat entre le laboratoire PROMES et la start-up DALE, est de proposer à ces pays une solution qui leur permettrait de produire des granulats localement en utilisant d'une part leur ressource en sable et d'autre part une énergie durable et abondante : l'énergie solaire. Pour ce faire, une étude des conditions de frittage sous flux solaire concentré en lit fixe et une étude des propriétés optiques (émissivité, absorptivité) de différents sables ont été menées. Les tests de frittage en lit fixe ont été effectués à l'aide d'une parabole qui délivre une puissance de 1,7 kW. Le sable a été disposé dans un cylindre où il a été chauffé sur sa surface supérieure par flux solaire concentré. La puissance a été contrôlée avec un système d'obturateur. Des thermocouples et un pyromètre permettent de mesurer la répartition de la température. Ces tests ont permis de caractériser les conditions de frittage des sables sous flux solaires concentrés, par estimations et mesures des puissances surfaciques nécessaires, des temps de chauffe ainsi que par l'analyse des profils de température. L'étude optique quant à elle a permis d'obtenir les valeurs d'émissivité et d'absorbance solaire et d'étudier l'influence du frittage des poudres sur ces propriétés. Ces expériences doivent permettre de mettre en place des essais de production de granulats en continu. Pour ceux-ci une parabole pouvant fournir 4,5kW sera utilisée, au foyer de laquelle un prototype innovant de frittage en continu sera expérimenté. L'objectif est d'établir la preuve de concept d'une production de granulats en continu sous flux solaire concentré.

Évaluation globale des impacts environnementaux, sociaux et économiques : étude comparative d'énergies renouvelables et non renouvelables

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

* ✉ : thierry.lemenand@univ-angers.fr

¹ Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS), UR 7315, Université d'Angers, Angers, France

Mots clés : Énergie renouvelable, énergie non renouvelable, impact économique, impact environnemental, impact social

Résumé :

Bien que les avantages environnementaux des sources d'énergie renouvelables par rapport aux sources non renouvelables soient largement reconnus, leur adoption demeure limitée en raison de coûts initiaux perçus comme élevés. Cette étude propose une analyse comparative approfondie des sources d'énergie renouvelables et non renouvelables, examinant leurs impacts économiques, environnementaux et sociaux. En combinant des données quantitatives et qualitatives, différentes options énergétiques sont évaluées, incluant les énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien, la biomasse, l'hydroélectricité et le stockage par pompage, ainsi que les énergies non renouvelables comme le charbon, le fioul, le gaz et l'électricité. Les résultats offrent un éclairage nuancé sur les avantages et limites relatifs de ces sources d'énergie, contribuant à éclairer les choix stratégiques en matière de politique énergétique, d'investissement et d'initiatives de développement durable. L'étude met en évidence la supériorité globale des sources d'énergie renouvelables, présentant des impacts économiques et environnementaux respectivement 2,8 et 10 fois inférieurs à ceux des sources non renouvelables. Les coûts économiques des énergies renouvelables varient de 3,3 à 8,9 c€/kWh et leurs coûts environnementaux de 0,036 à 1,04 c€/kWh, contre 6,7 à 25 c€/kWh et 1,54 à 23,4 c€/kWh pour les non renouvelables. Ces chiffres illustrent de manière explicite le rôle déterminant des énergies renouvelables dans la construction d'un avenir énergétique durable.

L'eau-tech : procédé de pasteurisation solaire d'eaux de surface pour sites isolés.

Jean-Marie Mancaux^{1,*}

* ✉ : jean-marie.mancaux@univ-perp.fr

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

Mots clés : Low-tech, Traitement de l'eau, Pathogènes, Maladies diarrhéiques, Récupération de chaleurs fatales

Résumé :

- Contexte : L'accès à l'eau potable est depuis toujours un des enjeux majeurs du développement à l'échelle mondiale. Bien que de nombreux progrès aient été réalisés au cours des dernières années, une partie importante de la population mondiale reste actuellement confrontée à des difficultés d'accès à une eau sans danger pour leur santé. Cette situation engendre des conséquences sanitaires majeures, notamment chez les populations les plus vulnérables (enfants, personnes âgées...). En 2024, on estime qu'environ 180 000 enfants de moins de cinq ans sont décédés en Afrique de maladies diarrhéiques liées à la consommation d'eau contaminée. On voit donc que la situation atteint le niveau d'urgence humanitaire mais aussi, cela met en avant une inadéquation entre les solutions existantes et les contraintes des territoires. En effet, les dispositifs de traitement de l'eau existants sont nombreux et efficaces dans des environnements développés et structurés, mais lorsqu'ils sont déployés dans des zones rurales isolées, ils présentent de nombreuses limites comme la dépendance à des ressources externes, le coût ou la complexité technique. Cette technologie "lowtech" répondant au contexte des sites isolés, son autonomie et sa simplicité sont des atouts majeurs. - Résultats : Des résultats ont été obtenus (*E. coli* et *Enterococcus*) avec des eaux de rivières en aval d'une station d'épuration. - Objectif : Mise en place d'un dispositif sur un site afin de valider la capacité d'abattement des pathogènes (analyses quotidiennes) en collaboration avec une association au Cameroun. Un rapprochement avec un acteur industriel local (KYA Energie Group) situé au TOGO et collaborant avec des ONG est en cours de réalisation afin de déployer ce dispositif. Formation sur chaque site pour une utilisation en autonomie.

Modélisation d'un système hybride PV–éolien–biogaz pour la transition énergétique des ZNI : île de San Andrés, Colombie

Mercedes Rodriguez Sarmiento^{1,*}, Doria Garcia Jose

* ✉ : mercedesrodriguez12@hotmail.com

¹ Institución Universitaria de Barranquilla

Mots clés :

Résumé :

Cette étude propose une évaluation avancée de la performance thermo-énergétique des bâtiments hôteliers dans un système énergétique insulaire non interconnecté. Le cas étudié correspond à l'archipel de San Andrés (Colombie), caractérisé par une dépendance quasi totale à la production d'électricité à partir de diesel . Un ensemble de 125 installations a été analysé à l'aide d'un indicateur de consommation spécifique (kWh/m²), permettant une normalisation de la demande énergétique. L'approche combine des méthodes statistiques (tests de normalité, cartes de contrôle, test LSD) avec une interprétation thermodynamique des bâtiments comme systèmes ouverts, intégrant les mécanismes de transfert thermique. Les résultats montrent une valeur moyenne de 1,89 kWh/m².mois pour les logements touristiques, avec une forte variabilité et plusieurs valeurs hors contrôle, révélant un potentiel important d'amélioration de la performance énergétique . L'analyse technologique met en évidence que les systèmes thermiques, notamment la climatisation et l'eau chaude sanitaire, représentent jusqu'à 40 % de la consommation totale . Des solutions telles que la récupération de chaleur, les systèmes HVAC à débit variable, les capteurs solaires thermiques et les systèmes de contrôle intelligent sont identifiées comme leviers d'optimisation. Cette recherche positionne San Andrés comme un territoire insulaire pionnier pour la transition énergétique, en proposant un modèle reproductible basé sur l'intégration de solutions thermo-énergétiques et renouvelables adaptées aux systèmes isolés.

Techno-Economic Analysis of Gasification-Based Power Generation from Olive Tree Pruning in the kabylia Region.

Abdenour Elias^{1,*}, Nassira Djebbar¹

* ✉ : elias.abdonour@gmail.com

¹ Université Saad Dahlab Blida 1, Blida, Algérie

Mots clés : Biomass , gasification , distributed power-generation, ORC, olive wastes, rural areas.

Résumé :

This study investigates the modelling and the simulation of a biomass-fuelled combined heat and power (CHP) system using olive tree pruning to produce electricity and low-temperature heat (40degC hot water). The proposed configuration integrates a 500 kW down-draft gasifier, a 100 kWe externally fired gas turbine, and an Organic Rankine Cycle (ORC). The generated syngas has the following composition : CO (20%), H₂ (16%), CO₂ (11.98%), CH₄ (2.98%), and N₂ (48%), with a lower heating value of 4.72 MJ/kg and a gasification efficiency of 73%. The turbine exhaust gases supply the ORC to enhance the heat recovery and the electricity production. Seven ORC working fluids are analysed : cyclohexane, R113, R245fa, benzene, methanol, isopentane, and pentane are evaluated. Isopentane delivers the highest electrical power with 35.4 kW, increasing the net power output from 75.8 kWe to 111.2 kWe and improving overall plant efficiency from 16.41% to 23.4%. Additionally, an economic analysis is conducted, evaluating the project's profitability using four key parameters : net present value, profitability index, internal rate of return, and payback period. The findings demonstrate favourable economic outcomes, primarily due to the low cost of the biomass fuel. The study highlights the potential of such systems to support sustainable, decentralised energy production in rural regions.

Vers une optimisation technico-économique du Sea Water Air Conditioning (SWAC) : développement d'un outil d'aide à la décision pour la conception

Kanhan Sanjivy^{1,*}, Olivier Marc¹, Franck Lucas²

* ✉ : kanhan.sanjivy@univ-reunion.fr

¹ PIMENT, University of Reunion Island, Saint-Pierre, La Réunion, France

² GEPASUD, University of French Polynesia, Faa'a, French Polynesia

Mots clés : SWAC (Sea Water Air Conditioning), Géothermie marine, Optimisation technico-économique, Aide à la décision, Modélisation dynamique, Simulation thermique du bâtiment

Résumé :

Le Sea Water Air Conditioning (SWAC) constitue une solution de refroidissement particulièrement pertinente pour les territoires insulaires et côtiers, en raison de ses très hautes performances énergétiques et de son faible impact carbone. Dans des travaux récents menés sur l'installation de Tetiaroa en Polynésie française, un modèle dynamique validé par mesures expérimentales et couplé à une simulation thermique du bâtiment a permis de montrer le fort potentiel d'optimisation de ce procédé. L'analyse de sensibilité a notamment mis en évidence l'influence majeure de la température de puisage sélectionnée, de la configuration de la boucle d'eau glacée, des échangeurs, et de la température de consigne sur les performances globales. L'optimisation multi-objectif a conduit à une amélioration très importante du COP global, de 24,7 à 85,6, tout en maintenant le confort thermique au sein du bâtiment. Dans la continuité de ces premiers résultats, ce work in progress vise à faire évoluer ce modèle vers un véritable outil d'aide à la décision pour la conception de systèmes SWAC. L'objectif est désormais d'intégrer explicitement une dimension économique au processus d'optimisation, afin de dépasser une approche uniquement énergétique et de réaliser une optimisation technico-économique du procédé. Dans ce cadre, un modèle de coût de la boucle « eau de mer » est en cours de développement. Cette fonction vise à estimer le coût d'investissement initial (CAPEX) associé aux conduites primaires, à partir de paramètres structurants tels que la longueur de conduite, la puissance frigorifique installée et la localisation géographique du projet. Cette loi de coût s'appuie sur les retours d'expérience des installations SWAC en Polynésie française, qui constituent une base de référence pour relier choix de conception, contraintes bathymétriques et coûts réels. Les premiers résultats montrent notamment que l'augmentation de la température de puisage permet de réduire significativement la longueur des conduites et, par conséquent, l'investissement initial. À terme, l'intégration de cette fonction de coût au modèle d'optimisation doit permettre de développer une méthodologie de prédimensionnement applicable à différents contextes géographiques. L'ambition est de proposer un outil capable d'identifier les meilleurs compromis entre performance énergétique, faisabilité technique et rentabilité économique, afin de faciliter le déploiement du SWAC à l'échelle internationale.

Thème 4

Conception et optimisation des échangeurs de chaleur

Analyse d'un thermosiphon fermé diphasique utilisant de l'eau à pression subatmosphérique .	30
Comparaison de la compacité d'échangeurs de chaleur dans le cadre d'un réacteur à sels fondus	31
Étude expérimentale et théorique d'un métamatériau concentrateur de chaleur	32
Étude préliminaire des transferts de masse et de chaleur lors de la vaporisation d'un écoulement d'eau à basse pression dans un canal étroit	33

Analyse d'un thermosiphon fermé diphasique utilisant de l'eau à pression subatmosphérique

Frédery Abadassi^{1,*}, Ahmed G. Rahma¹, Pierre François¹, Fabrice Lawniczak¹, Abdellah Ghenaim¹, Abdelali Terfous¹, Abderahmane Marouf¹, Denis Funfschilling¹

* ✉ : fredy.abadassi@insa-strasbourg.fr

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

Mots clés : Two-phase closed thermosiphon, boiling, condensation, cooling temperature, filling ratio, heat transfer, data center cooling.

Résumé :

Cette étude examine les performances thermiques d'un thermosiphon fermé diphasique en cuivre, rempli d'eau distillée et fonctionnant à pression subatmosphérique. Des expériences ont été menées avec un taux de remplissage de 80% et des puissances thermiques comprises entre 40,9 W et 201,9 W, tout en maintenant la température de refroidissement à 25 °C. L'analyse se concentre sur les coefficients d'échange thermique au niveau de l'évaporateur et du condenseur, ainsi que sur la résistance thermique globale. À faibles puissances, d'importantes oscillations dues à un phénomène d'ébullition de type geyser sont observées dans l'évaporateur. Ces instabilités diminuent à mesure que la puissance augmente, conduisant à un régime de fonctionnement plus stable.

Comparaison de la compacité d'échangeurs de chaleur dans le cadre d'un réacteur à sels fondus

Aubin Palmier^{1,*}, Xavier Jeanningros¹, Clément Renon¹, Matthieu Fenot², Dominique Couton²

* ✉ : aubin.palmier@ensma.fr

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

² Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA

Mots clés : réacteurs à sels fondus, comparaison, fabrication additive, TPMS, encrassement

Résumé :

L'avancée de la fabrication additive permet la conception de nouvelles géométries d'échangeurs de chaleur. Parmi elles, les échangeurs à surfaces dites TPMS Schwarz-diamant présentent un intérêt pour les réacteurs à sels fondus qui nécessitent des échangeurs de chaleurs compacts à faible risque d'encrassement. Cette étude vise à quantifier le gain de compacité d'un tel échangeur vis-à-vis d'un échangeur tubes et calandre, c'est-à-dire comparer le volume de sel fondu mobilisé côté primaire, dans une situation de fonctionnement fixée. La comparaison est effectuée à iso-puissance échangée, iso-températures, iso-débits, iso-diamètres hydrauliques et, iso-perte de charge coté primaire. La méthode présentée s'appuie sur les équations établies par Webb basées sur la conservation du coefficient d'échange global et de la puissance de pompage. Une équation supplémentaire est établie pour la conservation du rapport des débits entre les deux passes de chaque échangeur. A partir des corrélations existantes et dans le domaine de fonctionnement d'intérêt, la méthode montre un gain important de compacité apporté par les échangeurs TPMS par rapport à l'échangeur tubes et calandre.

Étude expérimentale et théorique d'un métamatériau concentrateur de chaleur

Mohammed Lachi*, Arthur E.H. Bruno¹, Renato Machado Cotta¹, Carolina P. Naveira-Cotta¹

* ✉ : m.lachi@univ-reims.fr

¹ Federal University of Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 21941-598, Brazil

Mots clés : Concentrateur thermique, Concentrateur de chaleur, Récupération d'énergie, Métamatériau concentrateur thermique

Résumé :

Cet article présente une analyse expérimentale et théorique d'un concentrateur thermique pouvant être modélisé comme un métamatériau thermique. La conception de ce concentrateur s'inspire de la récupération d'énergie à partir du panneau arrière d'un système photovoltaïque à haute concentration (HCPV), permettant la collecte simultanée de la chaleur provenant de quatre sources thermiques. Un dispositif expérimental intégrant des mesures de thermographie infrarouge a été mis au point. Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations numériques afin d'optimiser la conception du dispositif.

Étude préliminaire des transferts de masse et de chaleur lors de la vaporisation d'un écoulement d'eau à basse pression dans un canal étroit

Antoine Dumain^{1,*}, Guillaume Castanet², Florine Giraud¹, Benoit Stutz¹

* ✉ : antoine.dumain@univ-smb.fr

¹ LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB), CNRS UMR5271

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

Mots clés :

Résumé :

Afin d'améliorer les performances des évaporateurs pour les pompes à chaleur à eau comme fluide de travail, les transferts de masse et de chaleur se produisant dans un canal étroit rectangulaire lors de la vaporisation de l'eau proche du point triple sont étudiés. Le dispositif est constitué d'un échangeur à plaque plane de 170x150 mm dans lequel circulent deux fluides séparés par une plaque en acier inoxydable de 1 mm d'épaisseur. Le canal dans lequel circule le fluide de travail est de 5.1 mm d'épaisseur, celui dans lequel circule le fluide secondaire (eau également) est de 1 mm d'épaisseur. Le fluide de travail s'écoule à l'état liquide et proche du point de saturation dans la partie basse de l'échangeur. Il y est chauffé depuis la face arrière par le fluide secondaire engendrant un changement de phase liquide-vapeur. La vapeur générée est évacuée dans la partie supérieure de l'échangeur, partie reliée à un condenseur surdimensionné permettant d'imposer la pression dans l'installation. Cette pression est fixée à 10 mbar dans cette étude, correspondant à une température de saturation de 7degC. La différence entre la température d'entrée du fluide secondaire et la température de saturation du fluide de travail (surchauffe maximale) est imposée de manière décroissante à différentes valeurs comprises entre 30 K et 5 K. Le débit massique du fluide de travail est imposé à 5 kg.h⁻¹, 10kg.h⁻¹ et 20 kg.h⁻¹ et la hauteur de liquide est imposée à 1cm, 2cm et 4cm. La vitesse du fluide de travail est ainsi fixée à 1,36 cm.s⁻¹, 2,72 cm.s⁻¹ et 5,45 cm.s⁻¹. Des bilans d'énergie sont réalisés sur le fluide secondaire et le fluide de travail pour estimer les flux thermiques échangés. Une fenêtre transparente sur la face avant de 140*140mm permet la visualisation des phénomènes d'ébullition. De larges bulles de plusieurs centimètres apparaissent dans l'écoulement du fait de la faible densité de vapeur à cette pression. Lors de leur éclatement, de fins films de liquide sont projetés sur la surface chauffée. Ces films s'évaporent rapidement, intensifiant le flux thermique instantané. Il est montré que la moyenne temporelle du flux thermique augmente avec la surchauffe maximale, du fait de la nucléation et croissance d'un plus grand nombre de masses de vapeur. Le flux thermique échangé augmente également avec la hauteur de liquide, les bulles ayant une taille apparente finale avant éclatement plus importante, projetant davantage de liquide sur la paroi chauffée. L'effet du débit sur le flux thermique moyen échangé est en revanche limité. Afin de caractériser l'écoulement du fluide de travail pour plusieurs vitesses de fluide et de quantifier les effets conducto-convectifs sans changement de phase, une simulation numérique 3D est réalisée sous COMSOL. A l'aide de celle-ci, les différents modes de transfert sont estimés et discutés.

Thème 5

Machines thermiques, pompes à chaleur, systèmes frigorifiques

Transferts thermo-fluidiques en écoulement alterné incompressible dans un canal régénérateur - Analyse d'échelles et effet annulaire	36
Caractérisation expérimentale de deux éjecteurs pour un transformateur de chaleur à absorption NH ₃ -H ₂ O	37
Techno-economic and environmental assessment of an ammonia-water absorption refrigeration system driven by waste heat recovery for frozen warehouse	38

Transferts thermo-fluidiques en écoulement alterné incompressible dans un canal régénérateur - Analyse d'échelles et effet annulaire

Thierry De Laroche Lambert^{1,*}, Yannick Bailly¹, Jean-Claude Roy¹, Mickaël Perrin¹, Ali Ismail¹, Thierry Barriere¹

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

¹ Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

Mots clés : écoulements alternés, analyse d'échelle, transformation de Laplace, analyse de Fourier, échelles caractéristiques, nombre de Womersley, effet annulaire, couche limite visqueuse de Stokes, nombre critique

Résumé :

De nombreuses machines thermiques de froid produisent leur écart de température entre sources et puits chauds et froids au sein de régénérateurs à plaques métalliques actifs ou passifs par écoulement interne alterné de fluide caloporteur capable de transférer rapidement la chaleur produite ou absorbée à chaque demi-alternance. L'efficacité de ces transferts rapides est l'un des verrous les plus difficiles à lever, en particulier dans les machines magnétocaloriques, pour réduire leur volume, la quantité de matériaux actifs (magnétocaloriques, par exemple), leur coût et accroître leur puissance spécifique. L'étude analytique présentée dans cet article vient compléter les simulations numériques et expérimentations sur bancs d'essais effectuées au sein du laboratoire pour l'étude des écoulements alternés de liquides incompressibles dans des régénérateurs à plaques subissant des cycles magnétocaloriques actifs de réfrigération. Les équations des écoulements fluides incompressibles alternés quelconques, écrites de manière adimensionnelles, sont tout d'abord résolues analytiquement dans le domaine de Laplace pour établir les solutions des profils instantanés de vitesse et de température du fluide, des flux thermiques et contraintes visqueuses, des nombres de Nusselt Nu et de Poiseuille Po dans le cas des régénérateurs à gradient thermique linéaire. L'apparition d'un effet annulaire dans l'écoulement est mise en évidence. Afin de permettre une analyse fréquentielle systématique des résultats précédents, la résolution analytique est ensuite menée dans le domaine complexe en régime transitoire puis stationnaire pour obtenir les solutions complexes (profils de vitesse et de température du fluide, flux thermiques et contraintes visqueuses, nombres de Nusselt et de Poiseuille) en fonction des nombres adimensionnels de Womersley Rew et de Prandtl Pr . Les solutions sont ensuite généralisées à des écoulements alternés à séquences trapézoïdales similaires à ceux des bancs expérimentaux pour en analyser l'impact sur l'effet annulaire et les transferts thermiques au sein des régénérateurs, qui conditionnent fortement leur efficacité comme micro-échangeurs. Une analyse d'échelle fine fait apparaître les échelles spatiales et temporelles mécaniques et thermiques caractérisant l'émergence de couches limites de diffusion-advection de Stokes dans l'écoulement stationnaire, qui expliquent rigoureusement les déphasages entre température et flux thermique, vitesse et contrainte visqueuse. Elle conduit à deux nombres caractéristiques critiques dynamique et thermique de Womersley conditionnant l'émergence de l'effet annulaire dans les écoulements, et établit des corrélations moyennes $Po(Rew)$ et $Nu(Rew, Pr)$ aux basses et hautes fréquences, des valeurs critiques du nombre de Prandtl garantissant l'accroissement du flux thermique avec l'augmentation de la fréquence d'écoulement, et la dépendance mathématique du nombre critique de Womersley avec le nombre de Prandtl.

Caractérisation expérimentale de deux éjecteurs pour un transformateur de chaleur à absorption NH₃-H₂O

Mathilde Wirtz^{1,*}, Hai Trieu Phan¹

* ✉ : mathilde.wirtz@cea.fr

¹ CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

Mots clés : Transformateur de chaleur, Absorption, NH₃-H₂O, Ejecteur, Caractérisation expérimentale

Résumé :

Le projet européen ZIMBA vise à développer un transformateur de chaleur à absorption (TCA) économe en énergie, fonctionnant avec le couple ammoniac-eau, et valorisant la chaleur résiduelle industrielle pour produire ~15kWth à 110°C. Il est conçu pour intégrer un éjecteur permettant d'améliorer les performances de la machine et d'élargir son fonctionnement stable à des températures ambiantes plus élevées. L'étude présentée se concentre sur le développement d'un banc d'essai expérimental, visant à recréer les conditions thermodynamiques aux entrées et à la sortie de l'éjecteur dans le TCA ZIMBA. Ce banc d'essai permettra de caractériser deux éjecteurs de géométries différentes, numériquement conçus, puis fabriqués. L'éjecteur le plus approprié pour une meilleure performance du TCA sera ensuite implémenté dans le prototype ZIMBA. Le banc d'essai doit pouvoir reproduire les conditions à la sortie de l'évaporateur du TCA -entrée primaire- et du générateur -entrée secondaire-. Au point de fonctionnement nominal, la vapeur d'ammoniac contient moins de 2 % d'eau. Afin de simplifier la conception du banc d'essai, de l'ammoniac pur sera utilisé comme fluide de travail. Les températures nominales du flux d'ammoniac pur entrant dans l'éjecteur sur le banc d'essai sont adaptées pour correspondre à la même surchauffe qu'initialement modélisée aux entrées de l'éjecteur, à la même pression. L'ammoniac liquide circule entre deux échangeurs à plaques servant de condenseur et d'évaporateur noyé. Une bouteille de séparation en sortie de l'évaporateur permet d'envoyer une vapeur de qualité 1 dans l'éjecteur. Les pressions et températures aux entrées et sortie de l'éjecteur sont indépendantes des pressions fixées par les échangeurs grâce à l'ajustement de trois vannes. La suite du projet comprend l'assemblage et la mise en service du banc d'essai, la caractérisation des performances des éjecteurs, la comparaison et la validation du modèle, et enfin la valorisation des résultats.

Techno-economic and environmental assessment of an ammonia-water absorption refrigeration system driven by waste heat recovery for frozen warehouse

Van Kha Pham^{1,2,*}, Hai Trieu Phan³, Nolwenn Le Pierrès², Denis Leducq⁴, Hong-Minh Hoang⁴

* ✉ : kha.pham.88@gmail.com

¹ CEA Grenoble

² LabOratoire proCédés énergie bâtimEnt (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB), CNRS UMR5271

³ CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

⁴ INRAE

Mots clés : Techno-economic, ammonia-water, absorption refrigeration, Generator–Absorber heat exchange, waste heat recovery, frozen warehouse

Résumé :

Refrigeration and deep-freezing are essential for preserving perishable food products but represent a major share of energy use in the food industry, accounting for approximately 30-60 % of electricity consumption in commercial facilities. The growing demand for frozen food has further increased the need for low-temperature storage. Currently, most systems rely on vapor compression refrigeration (VCR), which is highly electricity-intensive and leads to a significant carbon footprint, particularly in regions such as Southeast Asia where power generation is largely fossil-based. In this context, alternative technologies with reduced electricity consumption are receiving increasing attention. Absorption refrigeration systems, which can be driven by industrial waste heat, represent a solution. For sub-zero cooling, the Generator-Absorber heat exchange (GAX) cycle using ammonia-water working pair offers improved thermodynamic efficiency compared to conventional single-effect systems. However, the application of this technology for low-temperature refrigeration, as required in cold storage (around -18 °C), has not yet been explored. This study develops and assesses a waste-heat-driven GAX absorption refrigeration system for cold storage by comparison with a conventional VCR system. The analysis focuses on evaluating techno-economic, and environmental performance using different indicators, including an electrical coefficient of performance (ECOP), thermal coefficient of performance (COP_{th}), payback period (PBP), net present value (NPV), levelized cost of cooling (LCOC), and CO₂ emission reduction potential. The preliminary results show that the VCR system achieves the ECOP of about 1.6 in weather conditions of Vietnam, reflecting reduced efficiency at low evaporating temperatures (-27 °C). The GAX system, operating under the same conditions and using pressurized water at 150 °C supplied from waste heat, attains the COP_{th} of approximately 0.25. This value is lower than that typically obtained under normal operating conditions for a conventional single-effect system (0.5-0.7). However, when accounting for all auxiliary electrical consumptions (cooling, heating, and solution pumps), the GAX system reaches the ECOP of around 11.5, significantly outperforming the VCR system and demonstrating strong potential for electricity savings. Future work will focus on detailed techno-economic and sensitivity analysis to assess the impact of key parameters such as capital cost and energy prices. This will provide further insight into the conditions under which waste heat-driven absorption systems can become economically viable and contribute to industrial decarbonization and net-zero emission targets.

Thème 6

Mesures thermiques et méthodes inverses

Bayesian inference for the estimation of thermophysical properties of filamentous fungal colonies	40
Caractérisation thermophysique de dépôts surfaciques sur composant face au plasma : quelle modélisation thermique du couple dépôt-substrat ?	41
Détermination expérimentale de la résistance de contact entre des plaques et des ailettes en créneaux par méthode inverse	42
Identification des paramètres thermo-dépendants et anisotropes pour un isolant thermique par modèle réduit	43
Inférence bayésienne pour l'estimation simultanée des propriétés thermiques de matériaux orthotropes	44
Pyromètre trois couleurs pour la mesure de l'absorptivité des métaux liquides à la longueur d'onde de chauffage	45
Conception et mise en œuvre d'une soufflerie d'étalonnage à air chaud pour caractériser des écoulements par métrologies optiques	46
Imagerie 3D des champs de température au sein de polymères semi-transparents	47
Iron Loss Evaluation via Infrared Thermography Imaging Using Thermal Inverse Methods . . .	48
Mesure de débit dans un écoulement non-isotherme par inter-corrélation de signaux thermiques	49
Mesure de la conductivité thermique à température cryogénique	50
Mesure de la température de contact lors du soudage par point	51
Preuve de Concept : Monitoring et Optimisation du chauffage d'une structure de voie en béton d'un métro automatique en période hivernale	52

Bayesian inference for the estimation of thermophysical properties of filamentous fungal colonies

Thomas Pierre^{1,*}, Helcio R. B. Orlando², Leonardo Antonio Bermeo Varon³, Mayara Gil Castro Santos⁴, Olivier Fudym²

* ✉ : thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

² Federal University of Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 21941-598, Brazil

³ School of Electrical and Electronics Engineering, Universidad del Valle, 100-00, Cali, Colombia

⁴ Laboratory BAKTRON, Rio de Janeiro, RJ, 20921-003, Brazil

Mots clés : Fungal colonies, Bayesian inference, infrared thermography

Résumé :

Les champignons jouent un rôle important dans diverses applications industrielles et médicales. La détection de la contamination par ces micro-organismes est essentielle pour prévenir les intoxications alimentaires chez l'homme et les mammifères domestiques. Ces intoxications surviennent en présence de mycotoxines, métabolites secondaires produits par les champignons lors de leur métabolisation. Dans certains cas, la détection des mycotoxines est plus coûteuse et plus longue que l'identification des champignons eux-mêmes. Le développement d'une méthodologie de détection précoce des champignons par thermographie est l'une des approches possibles pour atteindre cet objectif. Cette communication présente une estimation des propriétés thermophysiques d'*Aspergillus brasiliensis*, un champignon filamentueux fréquemment rencontré dans divers environnements. Un cadre bayésien de modélisation inverse est utilisé pour déterminer la capacité thermique volumique et la conductivité thermique, en tenant compte des incertitudes de mesure et de modélisation. Le champignon est chauffé dans un incubateur à 38 degC, puis refroidi à température ambiante (20 degC). La température de surface du champignon est mesurée à l'aide d'une caméra thermographique. La conduction thermique unidimensionnelle multicouche est modélisée pour le problème direct lors de la phase de refroidissement de l'échantillon. À partir de ces mesures de température et de la méthode bayésienne du problème inverse, tous les paramètres sont modélisés comme des variables aléatoires. La solution du problème direct est validée par une méthode de résolution alternative. Les paramètres d'intérêt sont estimés par la méthode de Monte Carlo par chaînes de Markov (MCMC). Une analyse statistique est réalisée afin d'évaluer la qualité des estimations, d'examiner l'influence des facteurs expérimentaux et d'évaluer la cohérence des résultats obtenus dans différentes zones de mesure.

Caractérisation thermophysique de dépôts surfaciques sur composant face au plasma : quelle modélisation thermique du couple dépôt-substrat ?

Clément Monet-Vidonne^{1,*}, Fabrice Rigollet^{1,2}, Jonathan Gaspar¹, Jean-Laurent Gardarein¹, Nathalie Ehret¹, Mathilde Diez³, Céline Martin⁴, Gregory Giacometti⁴

* ✉ : clement.monet-vidonne@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

² Aix Marseille Université

³ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

⁴ Aix Marseille Univ, CNRS, PIIM, Marseille, France

Mots clés : Méthode flash face avant ; Identification de propriétés thermophysiques de dépôts surfaciques ; Tokamak

Résumé :

Dans le contexte de la fusion nucléaire, le tokamak WEST (W Environment in Steady state Tokamak) est utilisé comme plateforme d'essai pour étudier l'interaction du plasma avec les composants face au plasma (CFP), en particulier ceux qui seront utilisés dans le tokamak international ITER. Au cours des campagnes expérimentales WEST, diverses dégradations des CFPs ont été observées. L'une d'entre elles est l'érosion des matériaux et leur redéposition sur d'autres composants. Ces dépôts, ainsi formés, ont des propriétés thermiques inconnues, mais probablement dégradées (faible diffusivité et/ou faible contact thermique avec le CFP). Lors des récentes campagnes expérimentales, ces dépôts ont eu un impact majeur puisqu'ils se sont détachés des CFPs et sont entrés dans le cœur du plasma, entraînant la fin prématurée de la décharge. L'enjeu de cette étude est d'améliorer notre compréhension de l'évolution des propriétés thermiques des CFPs lors de leur utilisation dans le tokamak WEST. Pour cela, nous avons développé des méthodes applicables directement sur un composant (sans découpe ni modification) pour étudier les caractéristiques thermiques des dépôts. Comme ils sont minces (de l'ordre de la centaine de nm à plusieurs dizaines de μm), une méthode flash en face avant est développée, par source de chaleur de type laser (10ns) ou lampe flash (80 μs), pour identifier les paramètres thermiques par inversion des mesures photothermiques. Les travaux présentés s'axent autour de la description thermique de trois zones d'intérêts pour les dépôts présents sur un CFP, à savoir, une zone de grande épaisseur (plusieurs dizaines de microns), une zone de dépôts intermédiaire (quelques microns) et une zone d'oxydation (centaines de nanomètres). Les différents modèles développés permettent de décrire les différentes couches constitutives des dépôts et ainsi de déterminer les propriétés thermiques associées (effusivité, diffusivité...). Elles permettront d'améliorer les modèles thermiques utilisés pour estimer la température maximale des CFPs et ainsi assurer la sécurité des composants lors de l'utilisation du tokamak WEST.

Détermination expérimentale de la résistance de contact entre des plaques et des ailettes en créneaux par méthode inverse

Thomas Varé^{1,*}, Natacha Darmet¹, Yves Jannot¹, Vincent Schick¹

* ✉ : thomas.vare@univ-lorraine.fr

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

Mots clés :

Résumé :

Les ailettes en créneaux interviennent dans de nombreuses installations industrielles, notamment dans les micro-canaux thermiques, les échangeurs de chaleur ou encore les dispositifs de refroidissement de composants électroniques. En raison de la géométrie complexe de ces ailettes, le contact avec leur environnement est souvent de mauvaise qualité, traduit par une résistance de contact élevée au niveau des interfaces. Afin de modéliser fidèlement le comportement thermique d'installations comportant des ailettes en créneaux et d'en garantir le bon fonctionnement, il est essentiel d'évaluer avec précision les valeurs des résistances de contact induites. L'objectif de ce travail est de proposer une méthode d'estimation de ces résistances de contact en régime transitoire par méthode inverse. Dans la configuration étudiée, des ailettes en créneaux en aluminium sont confinées entre deux fines plaques du même matériau. Un élément chauffant permet d'imposer une puissance réglable au niveau de la plaque inférieure. Des blocs d'isolants sont placés de part et d'autre de cet assemblage. Une masse est appliquée sur le dispositif afin d'étudier l'impact de différents niveaux de compression sur les résistances de contact. L'évolution des températures des tôles inférieure et supérieure est mesurée grâce à des thermocouples de type K. Un modèle simplifié unidimensionnel du banc expérimental, reposant sur le formalisme des quadripôles thermiques, est d'abord développé. Dans un premier temps, l'estimation fournie par ce modèle simplifié est validée à partir d'une simulation détaillée réalisée sur le logiciel COMSOL. Dans un second temps, des estimations de résistance de contact sont obtenues expérimentalement pour trois ailettes en créneaux, de géométries variées. Pour chaque ailette, on considère deux configurations : la première avec une compression forte exercée et la seconde avec une compression plus faible.

Identification des paramètres thermo-dépendants et anisotropes pour un isolant thermique par modèle réduit

Jianan Ni^{1,*}, Frédéric Joly¹, Yassine Rouizi¹, Olivier Quemener¹

* ✉ : jianan.ni@univ-evry.fr

¹ Université d'Évry, Université Paris-Saclay, Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique d'Évry, 40 rue du Pelvoux, 91020 Évry-Courcouronnes, France

Mots clés : Problèmes inverses, Modèle réduit, Paramètres thermo-dépendants

Résumé :

On présente ici une procédure d'identification des propriétés d'isolants thermiques à partir d'une seule expérience virtuelle, à partir de laquelle on recherche à la fois la capacité thermique constante, et la conductivité thermique, considérée soit comme anisotrope soit comme thermo-dépendante. On s'affranchit par ailleurs de la connaissance des conditions aux limites, puisque le coefficient d'échange convectif, en général mal connu, est également identifié. La procédure inverse, qui utilise la technique de région de confiance, s'appuie sur l'utilisation d'un unique modèle réduit de type modal quel que soit le scénario considéré, et pour une géométrie tridimensionnelle quelconque. Les résultats montrent qu'un modèle simplifié permet de simuler l'ensemble des configurations avec un rapport précision/temps de calcul satisfaisant.

Inférence bayésienne pour l'estimation simultanée des propriétés thermiques de matériaux orthotropes

Thomas Pierre^{1,*}, Coline Bourges¹, Helcio R. B. Orlando², Edouard Geslain¹, Philippe Le Masson¹, Julien Berger³

* ✉ : thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

² Federal University of Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 21941-598, Brazil

³ Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université, CNRS

Mots clés :

Résumé :

Cette communication est dans la continuité de premiers travaux sur l'estimation simultanée des conductivités et de la capacité thermique de matériaux orthotropes. L'originalité originale présentait la faisabilité de réaliser une expérience capable de visualiser simultanément à l'aide d'une seule caméra infrarouge quatre faces d'un même matériau orthotrope parallélépipédique : la face sollicitée thermiquement et trois autres faces des principales directions. Un modèle analytique 3D était développé par moyen de transformations intégrales de type Fourier dans les trois directions spatiales. Des tests d'estimation des propriétés thermiques d'un matériau quelconque étaient ensuite effectués à partir de températures simulées et bruitées à partir du modèle direct, communément appelés « crime inverse ». Une première spécificité est que la fonctionnelle concernait les températures aux trois directions à la fois. Par ailleurs, la minimisation reposait sur des températures transformées selon les directions transversales (Fourier) à celle de la surface concernée. L'inférence bayésienne a été utilisée pour l'estimation. Les temps de calcul pouvant être longs avec cette méthode, un classement pondéral de chaque mode a permis d'en réduire le nombre. Cette nouvelle communication développe les trois aspects expérimentaux, numériques et d'estimation. Une étude de sensibilité est d'abord proposée afin de valider l'usage d'une fonctionnelle à multiples observables. Par la suite, des tests d'estimation sont présentés à partir de données simulées, sans puis avec bruit, via le logiciel d'éléments finis Comsol Multiphysics® pour un matériau qui a les propriétés du balsa. Le balsa est donc testé expérimentalement, puis les températures obtenues sont ensuite transformées suivant le même protocole pour être minimisées avec le modèle direct afin d'estimer les trois conductivités et la capacité thermique. Les résultats sont ensuite discutés, notamment le modèle direct et les conditions limites étant donné l'important temps de calcul dû en partie au grand nombre de pixels propres à chaque face.

Pyromètre trois couleurs pour la mesure de l'absorptivité des métaux liquides à la longueur d'onde de chauffage

Thomas Pierre^{1,*}, Coline Bourges¹, Elodie Courtois¹, Mickaël Courtois¹, Maelenn Le Mener¹

* ✉ : thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

Mots clés : Pyrométrie, métaux liquides, hautes températures, absorptivité

Résumé :

Les simulations numériques développées pour simuler les procédés industriels à haute température, tels que le soudage, nécessitent la prise en compte des propriétés physiques thermodépendantes du matériau et de paramètres d'entrée comme la fraction absorbée de la puissance laser, généralement utilisée dans ces procédés. La littérature mentionne des valeurs d'émissivité, donc d'absorptivité via la loi de Kirchhoff pour une longueur d'onde et une direction données, mais généralement pour une longueur d'onde de 645 nm. Cependant, dans le cas de métaux liquides, si l'on suppose que les propriétés radiatives sont relativement constantes en fonction de la température, la dépendance à la longueur d'onde existe. Par conséquent, cette étude vise à augmenter les connaissances sur l'émissivité/absorptivité spectrale des métaux liquides dans le domaine infrarouge et plus précisément pour les longueurs d'onde spécifiques des lasers utilisés lors du soudage. Expérimentalement, la puissance initialement émise par le laser peut être mesurée à l'aide d'un puissance-mètre calorimétrique. Mais l'absorptivité varie selon la longueur d'onde du laser et les principales longueurs d'onde laser utilisées dans l'industrie sont 1 064 nm (Nd :YAG), 1 070 nm (laser à fibre), 1 030 nm (lasers à diodes) et 10 μ m (laser CO₂). Cette étude porte sur un laser à fibre d'ytterbium de 1 070 nm. La mesure directe de l'absorptivité à la longueur d'onde du laser est possible mais pas lorsque le laser est allumé, car les signaux reçus par les instruments associés à l'expérience (pyromètre, spectroradiomètre, etc.) sont perturbés et saturés. Une solution consiste à traiter les signaux pendant le refroidissement, c'est-à-dire lorsque le laser est éteint. Cependant, la mesure de l'absorptivité suppose la connaissance de la température, conformément à la loi de Planck. Bien utilisée, la pyrométrie multispectrale est une méthode adéquate pour mesurer simultanément la température et l'émissivité. Dans ce cas, trois signaux mesurés à trois longueurs d'onde différentes suffisent : deux signaux pour la mesure de la température (avec une hypothèse sur le ratio d'émissivité déterminé au plateau de solidification) et, une fois celle-ci connue, un signal pour la mesure de l'absorptivité. Cette communication présente le développement théorique, lequel est testé sur les matériaux suivants : le fer, le zirconium et le nickel. Les résultats ainsi que les calculs d'incertitude sont également proposés.

Conception et mise en œuvre d'une soufflerie d'étalonnage à air chaud pour caractériser des écoulements par métrologies optiques

Morgane Veca^{1,*}, David Donjat¹

* ✉ : morgane.veca@onera.fr

¹ ONERA/DMPE, Université de Toulouse, Toulouse, France

Mots clés : aérothermique, jet chaud, métrologie optique

Résumé :

Dans un contexte où l'optimisation des performances aéronautiques doit s'accompagner de la réduction de l'impact environnemental, la caractérisation des écoulements aérothermiques turbulents complexes s'avère indispensable. La représentation fidèle des phénomènes physiques, à l'origine de la performance d'un système, permet de mieux comprendre et anticiper les problèmes qui peuvent survenir. La caractérisation de ces écoulements repose sur l'étude des champs de vitesse, de température et de masse volumique aux évolutions spatio-temporelles complexes. Leur investigation expérimentale nécessite des techniques de mesure à la fois fiables, de haute précision et très riches en échantillonnage spatial et temporel, afin de capturer des comportements caractérisés par de forts gradients. Les mesures optiques développées pour la mécanique des fluides offrent le double avantage d'être non intrusives et de fournir un échantillonnage dense. Elles restent toutefois limitées par la résolution spatiale ou le nombre de grandeurs accessibles. C'est dans ce contexte que l'ONERA développe différentes métrologies optiques permettant d'améliorer la caractérisation des écoulements aérothermiques pour la mesure de la vitesse (Particle Image Velocimetry et PTV), de la masse volumique (Background Oriented Schlieren) et de la température. Afin de valider et de comparer ces différentes techniques, une soufflerie à air chaud et à bas nombre de Reynolds a été conçue dans ce but. Le banc DEMETHER (pour Développement de Métrologies pour l'Aéro Thermique) est une installation transportable dont l'écoulement « jet d'étalonnage » est parfaitement maîtrisé. Ce jet, reproduisant les conditions de température, de débit et de nombre de Reynolds d'un cas réel, sert de référence pour caractériser l'ensemble des techniques de mesure précédemment citées. La mise en place de la soufflerie d'étalonnage ainsi que les premiers essais sont actuellement en cours.

Imagerie 3D des champs de température au sein de polymères semi-transparents

Jordan Letessier^{1,*}, Stéphane Chevalier², Jérémie Maire¹

* ✉ : jordan.letessier@u-bordeaux.fr

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

² Arts et Métiers, ENSAM, Paris, France

Mots clés : Thermographie Infrarouge, Imagerie photothermique hétérodyne, Méthodes inverses, Semi-transparent, Laminographie, Reconstruction 3D, Thermotransmittance, Thermo-réflectance, Thermoabsorbance

Résumé :

Pour comprendre les transferts thermiques dans des systèmes hétérogènes à géométrie complexe (variations des propriétés thermiques, sources enfouies, petites échelles), l'obtention de mesures de température tridimensionnelles (3D) sans contact constitue un outil puissant. Les techniques existantes se répartissent généralement entre mesures bidimensionnelles (2D) couplées à des méthodes inverses, et mesures 3D directes, nécessitant moins d'hypothèses et mieux adaptées aux géométries complexes. Les applications concernent notamment l'électronique, les matériaux composites et la microfluidique. Nous nous intéressons ici à cette dernière, où les transferts thermiques sont fortement couplés aux écoulements convectifs dans des géométries confinées. Ces systèmes présentent un défi expérimental du fait de leurs faibles dimensions (quelques millimètres d'épaisseur) et, pour certaines approches optiques, de la faible sensibilité de l'indice de réfraction à la température ($\partial n / \partial T$ 10^{-3} à 10^{-5} K⁻¹). Pourtant, la maîtrise du champ thermique y est essentielle, par exemple pour l'amplification d'ADN par réaction en chaîne par polymérase (PCR), qui requiert des cycles thermiques précisément contrôlés. Dans ce contexte, nous proposons un système de mesure 3D des champs d'élévation de température dans un milieu semi-transparent en PDMS, fondé sur l'imagerie photothermique hétérodyne en transmission (TPHI). L'amélioration du rapport signal/bruit apportée par la détection hétérodyne permet de surmonter la faible sensibilité thermo-optique du milieu. La méthode exploite la variation, avec la température, de la réflectance et de l'absorbance de la lumière incidente. Le signal transmis est mesuré sous plusieurs angles par laminographie, puis reconstruit en 3D par un algorithme SIRT, avec une résolution inférieure à 20 μm /voxel. La sensibilité atteint la dizaine de mK dans le PDMS. Nous présenterons la méthode et l'imagerie 3D d'un champ thermique induit par excitation laser d'une couche de PDMS.

Iron Loss Evaluation via Infrared Thermography Imaging Using Thermal Inverse Methods

Fatima Hassan^{1,*}, Oualid Messal, Abdelkader Benabou¹, Aouali Abderezak, Alain Sommier²

* ✉ : fatima.hassan.etu@univ-lille.fr

¹ L2EP, Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France

² Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, Talence, F-33400, France

Mots clés : Function specification method (FSM), Infrared thermography imaging, Inverse heat conduction problem (IHCP), Inverse thermal methods, Iron losses, Kalman filter, thermal quadrupoles, Tikhonov regularization, Truncated singular value decomposition (TSVD)

Résumé :

Achieving high energy efficiency is the primary objective in all areas of electrical energy applications. In this context, the design of high-efficiency energy conversion devices, such as electrical machines, relies critically on accurate knowledge and quantification of iron losses in their magnetic core, which must be considered from the earliest design stages. Yet, iron losses in magnetic materials are notoriously difficult to assess reliably under real operating conditions. Conventional fluxmetric methods, including the standardized Epstein frame and single sheet tester, are widely used but rely on dedicated sample preparation and are therefore destructive. Moreover, they provide only a global evaluation and fail to capture local iron losses, highlighting the need for alternative approaches. In magnetic materials, iron losses are dissipative phenomena, that are entirely dissipated as heat within the core material. Thus, this fundamental principle underpins the present study. The approach consists of using the heat dissipated by ferromagnetic materials under an AC magnetic excitation field as a direct means of characterizing their iron losses. The objective is to assess how these losses evolve under different operating conditions in terms of : excitation frequency and waveform ; manufacturing-induced mechanical stresses ; mechanical stresses during operation ; the magnetic anisotropy of certain materials, and temperature-induced changes in magnetic properties over time (magnetic aging), while analyzing their spatio-temporal distribution within the material. This is of particular interest for electrical machines, where both the spatial distribution and magnitude of iron losses depend on the operating conditions. This involves using infrared (IR) thermography to carry out non-contact temperature field measurements in a magnetic steel strip subjected to an AC magnetic field. The measured temperature data are then used to reconstruct the dissipated power through thermal modelling of the heat transfer within the material (using thermal quadrupoles) and various inverse mathematical methods. Unlike conventional approaches, this method is designed to allow local and real-time estimation of iron losses under realistic magnetic excitation conditions. To ensure the accuracy and robustness of the proposed method, different inverse heat conduction problem solutions have been considered : Tikhonov regularization, Kalman filter, truncated singular value decomposition (TSVD), and the function specification method (FSM). The latter are implemented and compared with the conventional iron loss measurement method to assess their effectiveness. Finally, this approach leads to the development of an innovative and complementary method, that, once properly calibrated, enables the quantitative measurement of iron losses using only a quantum IR camera and an inverse thermal model.

Mesure de débit dans un écoulement non-isotherme par inter-corrélation de signaux thermiques

Clément Lourd^{1,*}, Ophélie Caballina², David Guenadou, Alexandre Labergue², Samuel Masse¹, Frédéric Rey¹

* ✉ : clement.lourd@cea.fr

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

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

Mots clés : mesure de débit, intercorrélation, traitement de signal

Résumé :

La mesure de débit est une donnée primordiale dans la conduite de procédés dans les domaines nucléaire et industriels. Les techniques déployées pour effectuer cette mesure sont souvent intrusives et nécessitent, dans le cas de mise en œuvre a posteriori de la construction du procédé, de réaliser des interventions lourdes pour les installer puis les calibrer. Ces opérations sont coûteuses et peuvent nécessiter un délai d'installation important en raison de contraintes réglementaires. De plus, dans certaines configurations ou conditions thermo hydrauliques extrêmes, l'utilisation des techniques standards de mesure peut être invisable. Afin de contourner ces contraintes, le CEA a développé une méthode non intrusive de mesure de débit dans un écoulement non-isotherme, basée sur l'analyse de la propagation de signaux thermiques. La mesure en deux ou plusieurs points de l'écoulement des fluctuations de température transportées permet de déterminer, via une fonction d'intercorrélation, le temps de vol entre ces points de mesure espacés d'une distance fixe. Le calcul du débit est alors possible à partir des données du système et des mesures. Cette technique de mesure innovatrice est évaluée au CEA dans le cas d'une géométrie représentative d'un échangeur tube et calandre. Dans cet article, nous présentons les premières études menées pour déterminer l'influence des paramètres du système de mesure, tels que la position des points de mesure, la vitesse de l'écoulement et l'intensité des fluctuations thermiques. La qualité des mesures a été évaluée en fonction des paramètres imposés sur la boucle expérimentale, tel que le débit de l'écoulement, ainsi que d'un facteur de qualité construit à partir du résultat d'intercorrélation des signaux thermiques.

Mesure de la conductivité thermique à température cryogénique

Jean Pierre Monchau^{1,*}, Thomas Pierre², Laurent Ibos³, Rodolphe Petit¹

* ✉ : monchau@themacs.fr

¹ THEMACS Ingénierie, Champs-sur-Marne, France

² Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

³ Université Paris Est Créteil, CERTES, OSU Efluve

Mots clés : LH2, cryogénie, méthode inverse

Résumé :

Pour le stockage et le transport du gaz liquéfié, il est utile de connaître les propriétés thermo-physiques des matériaux. L'hydrogène liquide est aujourd'hui un sujet de développement important. Cette étude porte sur le développement d'un dispositif permettant de caractériser les propriétés thermiques à basse température. Le dispositif sur une mesure en régime permanent du gradient thermique sur une barre de section connue. La méthode la plus couramment utilisée pour mesurer la conductivité thermique des métaux est la méthode du barreau gardé. Elle consiste à chauffer une barre métallique en régime permanent et à mesurer le gradient de température. Cette méthode est incontournable à haute température, où le rayonnement représente des pertes importantes. À température cryogénique, les pertes les plus importantes sont les pertes par conduction et par convection. Pour éviter les échanges avec l'air, la solution consiste à placer le dispositif sous vide poussé (10-5 mbar à 10-6 mbar). On chauffe l'échantillon à l'aide d'une résistance électrique placée d'un côté du barreau et on refroidit l'autre côté grâce à une tête froide permettant d'atteindre 10 K. En utilisant un régime de chauffage par peigne de Dirac, il a été possible d'identifier la capacité thermique volumétrique en fonction de la température. On a décomposé le dispositif en quadripôles qui représentent les différents éléments traversés par le flux thermique. Le peigne de Dirac a été choisi pour exciter les fréquences significatives en fonction de la diffusivité thermique supposée de l'échantillon et de sa géométrie. L'avantage du peigne de Dirac est sa richesse en harmonique et la possibilité ouverte de réaliser une série de Fourier pour déterminer la fonction de transfert entre deux points de mesure de température. Par une méthode inverse on peut retrouver le temps caractéristique du barreau et ainsi remonter à la diffusivité thermique et à la capacité thermique volumique. Cette étude est complétée par une étude de sensibilité et un calcul d'incertitude permettant d'évaluer la performance du dispositif.

Mesure de la température de contact lors du soudage par point

Edouard Geslain^{1,*}, Rémy Ndoumou¹, Thomas Pierre¹

* ✉ : edouard.geslain@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

Mots clés : Soudage

Résumé :

Lors du soudage par résistance par point, un fort courant électrique traverse plusieurs tôles d'acier pincées entre des électrodes en cuivre. Le procédé ne dure que quelques centaines de millisecondes et permet d'atteindre la fusion des tôles. La température à l'interface varie très rapidement (entre 10 et 40 °C par milliseconde en fonction du revêtement) grâce, ou à cause, des résistances de contact électrique. Cette température n'est pas mesurable pas des moyens intrusifs qui perturbent le passage du courant. Une méthode de soudage en demi-point a été développée, et une caméra infrarouge est utilisée pour visualiser les échauffements initiaux, avant la formation du noyau. Mais un nouveau problème entre en jeu : l'effet de taille de source. Dans la configuration en demi-joint, le flux mesuré par la caméra aux pixels de ciblés est supérieur au flux du corps noir à la même température (étudié présenté lors d'un précédent congrès SFT). Le travail proposé ici est une alternative du soudage en demi-point avec pour objectif la mesure de la température de contact au cours du soudage. Pour cela, la caméra infrarouge vise une fine rainure entre deux tôles et un thermocouple dans une autre rainure est utilisé pour valider la mesure de température.

Preuve de Concept : Monitoring et Optimisation du chauffage d'une structure de voie en béton d'un métro automatique en période hivernale

Jean Dumoulin^{1,*}, Thibaud Toullier¹, Mathias Malandain, Nicolas Le Touz, Jean-Luc Manceau¹,

* ✉ : jean.dumoulin@univ-eiffel.fr

¹ Université Gustave Eiffel

Mots clés : Instrumentation, Predictive Control Model, Méthodes inverses, structure en béton, Environnement climatique extérieur, thermographie infrarouge

Résumé :

Le nouveau métro automatique ligne B de Rennes emprunte une voie en béton. Moins de bruit. Moins de vibrations. Un métro roulant sur une voie en béton apporte une meilleure adhérence permettant une optimisation des temps de trajets sur des tracés de voie exigeants. Pour contrer les effets du froid, un système de chauffage électrique assure le dégivrage de cette piste. Afin d'optimiser l'efficacité énergétique de ce dispositif, différentes actions de Recherche en modélisation thermique du chauffage de voie et de son instrumentation in-situ ont été conduites par l'équipe I4S ((Université Gustave Eiffel & Inria) dans le cadre d'une collaboration avec la société Siemens. Ces travaux ont été initiés en 2012 par le développement de premiers modèles numériques suivis par des essais en laboratoire. Un premier passage à l'échelle décamétrique a été mis en œuvre à partir de 2014 sur une structure de voie béton construite sur le campus de Nantes de l'Université Gustave Eiffel. En 2020, un passage à l'échelle sur la nouvelle ligne de métro Rennes B a été engagé et se poursuit autour de l'optimisation du système de monitoring et de prédiction du besoin de chauffage. Nous proposons dans cette présentation, une revue des différentes étapes et de quelques résultats majeurs obtenus lors cette preuve de concept, depuis les premières modélisations thermiques de la structure de voie, au développement d'un modèle prédictif sur le besoin de chauffage sous contrainte de consommation d'énergie couplé à l'utilisation d'une instrumentation in-situ.

Thème 7

Méthodes numériques et modélisation en thermique

Analyse de sensibilité de différents cycles de Brayton	55
Comparaison d'un calcul CFD avec des tests expérimentaux afin de déterminer un modèle prédictif de globe noir en fonction de la charge solaire	56
Couplage conducto-radiatif de structures poreuses hétérogènes dans un maillage tétraédrique	57
Etude numérique de l'intégration de matériaux à changement de phase dans les parois des chambres froides pour le stockage des produits alimentaires	58
Evaluation de la dégradation d'un élément de drone par impact d'un faisceau laser	59
Évaluation thermo-énergétique d'un stockage actif à matériaux à changement de phase intégrant une modélisation adimensionnée	60
Méthode inverse pour l'estimation des propriétés thermiques d'une cellule cylindrique de batterie	61
Modélisation hydro-thermique d'un système géothermique : l'échangeur air-sol et le sol environnant	62
Modélisation macroscopique du comportement thermique d'un module de batterie de véhicules électriques	63
Simulation numérique directe des écoulements gas-particules dans les récepteurs solaires de tour à concentration	64
Une approche Monte Carlo pour l'analyse de sensibilité d'un système de pompe à chaleur automobile	65
Une approche pseudo-analytique basée sur la formulation « improved lumped » pour la reconstruction transitoire du flux thermique en écoulement dispersé sous conditions de type APRP	66
Une Nouvelle Stratégie de Refroidissement des Batteries Lithium-Ion par stockage de chaleur dans des Matériaux à Changement de Phase	67
3E analysis of PCM applied in building walls in the climatic conditions of Strasbourg	68
A First-Principles Framework Based on Virtual Crystal Approximation for Calculating the Lattice Thermal Conductivity of Doped Si1– Ge Alloys	69
A novel model for ejector performance mapping across the full operating range	70
Assessment of CATHARE-3 3D module on TRIGA reactor	71
Etude de la validité d'un nouveau modèle théorique de prédiction de la conductivité thermique et de la viscosité pour des calculs CFD.	72
Étude et modélisation du transport des phonons dans les alliages par la méthode de Monte Carlo ; applications au calcul de la conductivité thermique du SiGe et l'InGaAs.	73

Méthode Monte Carlo par échantillonnage statistique de raies pour des estimations radiatives non biaisées dans les incendies	74
Towards Electrification of Biomass Pyrolysis in Fluidized Bed for Bioenergy Generation	75
Validité de la similitude de Froude pour un feu de cavité représentatif d'une façade ventilée - étude numérique	76

Analyse de sensibilité de différents cycles de Brayton

Louis Mougenot^{1,*}, Philippe Baucour¹, Francois Lanzetta¹, Nicolas Gaud², Alexis Sesmat³

* ✉ : louis.mougenot@neext.email

¹ Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France

² UTBM, CIAD, F-90010 Belfort, France

³ NEEEXT ENGINEERING

Mots clés : Cycle de Brayton ; analyse de sensibilité (Sobol) ; rendement thermique ; travail net ; régénération ; réchauffe ; refroidissement intermédiaire

Résumé :

Cette étude porte sur l'influence de paramètres clés sur la performance de plusieurs configurations de cycle de Brayton (simple, avec réchauffe, avec régénération, avec refroidissement intermédiaire et cycle complet combinant ces dispositifs). Une modélisation au niveau composant (compresseur et turbine avec rendements isentropiques, pertes de charge dans les échangeurs, efficacité du régénérateur) est couplée à une analyse de sensibilité globale de type Sobol afin d'identifier les leviers dominants sur le travail net et le rendement thermique, sous une contrainte d'apport thermique fixée. Les paramètres étudiés incluent les températures des différentes sources, les rapports de pression, les rendements des composants ainsi que les pertes de charge dans les échangeurs, chacun étant considéré sur une plage de variation réaliste. L'échantillonnage de Saltelli permet d'estimer les indices de sensibilité d'ordre 1 et total. L'approche suivie conserve les bilans énergétiques et les irréversibilités locales, tout en maintenant l'apport de la source constant, de sorte que les variations de puissance et de rendement sont directement corrélées. Les résultats montrent que la température maximale du cycle (température d'entrée turbine) est le paramètre prédominant (indices de Sobol les plus élevés), devant les rendements isentropiques du compresseur et de la turbine ; le rapport de compression et les pertes de charge exercent une influence modérée. Parmi les architectures, la régénération et surtout le cycle complet procurent les gains les plus marqués en travail net et en rendement, tandis que la réchauffe n'est profitable que dans des contextes de chaleur disponible, compte tenu des pertes supplémentaires induites. Ces enseignements orientent le dimensionnement vers l'élévation de la température maximale, l'amélioration des rendements et le contrôle des pertes pour optimiser la performance des systèmes Brayton. La méthode de Sobol offre ainsi une base pertinente pour relier la sensibilité des performances aux impacts économiques, en identifiant les paramètres dont l'optimisation influence le plus le coût global du cycle.

Comparaison d'un calcul CFD avec des tests expérimentaux afin de déterminer un modèle prédictif de globe noir en fonction de la charge solaire

François-Xavier Keller^{1,*}, Laurence Robert¹

* ✉ : keller@inrs.fr

¹ Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Vandœuvre-lès-Nancy, France

Mots clés : Mécanique des fluides numérique, Thermique, Charge solaire, Globe noir

Résumé :

Le changement climatique, accompagné de périodes de fortes chaleurs, modifie significativement les environnements de travail thermiques des salariés, notamment ceux travaillant en extérieur. Parmi les méthodes d'évaluation des risques liés aux environnements thermiques, la méthode PHS (Predicted Heat Strain) est la plus prévisible, car elle repose sur l'évaluation de l'ensemble des échanges thermiques entre l'homme et son environnement de travail. Parmi ces échanges thermiques, le rayonnement est déterminant et impacte fortement l'état de stress thermique du salarié, mais il nécessite une métrologie complexe : la mesure par le globe noir. Dans le cas spécifique du travail en extérieur, la recherche d'une corrélation entre le flux solaire et la température du globe noir par simulation numérique est initiée dans ce travail. Elle permettrait de s'affranchir d'une métrologie spécifique et d'alimenter le modèle de stress thermique PHS pour le simplifier. Pour cela, un modèle de simulation numérique est implémenté à l'aide du logiciel de calcul STARCCM+. Une géométrie 3D est prise en compte avec un globe noir de 15 cm de diamètre. Différentes configurations de calcul sont réalisées afin de simuler les échanges thermiques autour de ce globe. Les résultats de ce modèle en termes de prévision de la température du globe sont comparés à ceux de mesures expérimentales réalisées durant l'été 2025 avec un globe noir de 15 cm de diamètre connecté à une unité centrale TESTO 480. Selon les tests, les flux solaires ont pu être mesurés à l'aide de deux pyromètres KIPP & ZONEN CM 6B ou collectés directement sur des sites météorologiques. À partir d'une vingtaine de points de comparaison, le modèle prédit la température globale. Ces résultats sont encourageants pour la définition d'une fonction reliant le flux solaire à la température du globe noir.

Couplage conducto-radiatif de structures poreuses hétérogènes dans un maillage tétraédrique

Léo Royon^{1,2,*}, Frédéric Joly², Cyril Daout¹, Denis Rochais¹, Yassine Rouizi²

* ✉ : leo.royon@universite-paris-saclay.fr

¹ CEA Le Ripault, Centre d'études du Ripault

² Université d'Évry, Université Paris-Saclay, Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique d'Évry, 40 rue du Pelvoux, 91020 Évry-Courcouronnes, France

Mots clés : Thermique, Rayonnement, Lancer de rayons Monte-Carlo, Couplage conducto-radiatif

Résumé :

A l'aide d'un nouveau modèle numérique de couplage de la conduction et du rayonnement thermiques, nous cherchons à caractériser des matériaux poreux hétérogènes à structure complexe et soumis à des hautes températures. Ce dernier modélise la conduction de manière déterministe par une méthode éléments finis, et le rayonnement de manière stochastique par lancer de rayons Monte-Carlo. L'ensemble de la simulation a lieu dans un maillage tétraédrique non structuré. Cet outil permet d'obtenir le champ de température couplé 3D, ainsi que les flux conductif, radiatif et le flux total selon une direction choisie. La géométrie étudiée est issue d'une tomographie par rayons X d'un échantillon de matériau fibreux, représentée initialement par une « image » de taille 8403 voxels. Cette dernière est ensuite maillée en tétraèdres non structurés puis étudiée. La phase solide (les fibres) est considérée comme opaque dans un premier temps, bien que l'objectif à terme de l'outil soit de pouvoir représenter le comportement semi-transparent exhibé par les fibres. A cette fin, les rayons se propagent de tétraèdre en tétraèdre et non pas d'interface en interface (on ne calcule pas des longueurs d'extinction) comme pour la plupart des lancers de rayons actuels. L'aspect novateur de cette étude se trouve dans la gestion des conditions aux limites radiatives, ainsi que dans le calcul du flux radiatif. En effet, le rayonnement et la conduction sont traités de manière indépendante, mais doivent être cohérents et permettre d'obtenir un flux total qui se conserve. Une récente étude d'analyse comparée [1] a montré que cette conservation n'était pas toujours obtenue selon les approches de modélisation du couplage conducto-radiatif retenues. Par ailleurs, ce code de calcul permet de traiter des volumes numériques proches d'un VER sur un ordinateur de bureau et en des temps de calcul parfaitement raisonnables malgré son aspect stochastique. Pour illustrer les capacités de cet outil numérique, nous présentons une étude paramétrique sur l'évolution des profils de flux radiatif et conductif pour un matériau poreux en fonction des paramètres thermo-physiques du problème. [1] L. Pénazzi et al, « Comparative analysis of methods for solving conduction-radiation coupling in heterogeneous materials », 11th International Symposium on Radiative Transfer RAD-25 June 15-20, 2025

Etude numérique de l'intégration de matériaux à changement de phase dans les parois des chambres froides pour le stockage des produits alimentaires

Michel Havet^{1,*}, Cyril Toubanc¹, Olivier Rouaud¹, Zakaria Ouaouja¹, Abdellah Ousegui

* ✉ : michel.havet@oniris-nantes.fr

¹ Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144, Nantes, France

Mots clés : MCP, chambre froide, co-simulation, EnergyPlus

Résumé :

Cette étude présente une évaluation numérique de l'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) sur la surface intérieure des parois des chambres froides afin d'en améliorer l'efficacité énergétique, la stabilité de la température des produits et la flexibilité énergétique. Un modèle dynamique de stockage frigorifique a été développé à l'aide d'EnergyPlus en co-simulation avec MATLAB pour prendre en compte l'impact sur la température des produits stockés à température positive (produits frais) et négative (produits congelés). L'influence de la température de fusion et de l'épaisseur des PCM a été analysée à travers une étude paramétrique, en se concentrant sur deux critères : la consommation d'énergie et la fluctuation de la température des produits. Les résultats montrent que l'intégration des PCM limite efficacement les variations de température des produits, améliorant ainsi la stabilité thermique dans diverses conditions de fonctionnement. Cependant, dans la plupart des scénarios, les économies d'énergie restent négligeables sans la mise en œuvre d'une stratégie de contrôle de la production de froid. Lorsqu'ils sont associés à une approche de réponse à la demande, les PCM permettent une réduction d'énergie significatifs tout en préservant la qualité des produits. Cela souligne l'importance des stratégies de contrôle actif pour exploiter pleinement le potentiel d'économie d'énergie des PCM dans les applications de stockage frigorifique.

Evaluation de la dégradation d'un élément de drone par impact d'un faisceau laser

Philippe Reulet^{1,*}, Pierre Bourdon², Nicolas Dellinger¹

* ✉ : philippe.reulet@onera.fr

¹ ONERA/DMPE, Université de Toulouse, Toulouse, France

² ONERA/DOTA, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

Mots clés : matériau composite, drone, dégradation laser, ablation

Résumé :

Dans certaines situations, il est nécessaire d'être en mesure de neutraliser des structures de type drone ayant des activités non autorisées. Un chargement émergent a démontré son efficacité à des fins de neutralisation : le chargement laser. Alors que la neutralisation laser a déjà pu être démontrée opérationnellement, il ne semble pas y avoir d'outil numérique permettant de statuer sur la neutralisation laser d'une structure. Dans le cadre du projet de recherche interne Onera « ARE-NEUTR », plusieurs outils numériques ont été évalués pour estimer les effets du chargement laser sur une structure et envisager un couplage pour prévoir le comportement du drone impacté. L'Onera travaille depuis de nombreuses années à la modélisation de la dégradation de matériaux composites aéronautiques soumis à un événement feu. D'une part des moyens expérimentaux de caractérisation des propriétés thermiques de ces matériaux ont été développés en association avec un code de simulation numérique MoDeTheC pour modéliser le comportement du matériau soumis au feu. L'objet de ces travaux est d'évaluer l'applicabilité de ce code de simulation thermique pour estimer précisément les effets thermiques du chargement d'une pièce en matériau composite ou métallique par une arme laser : calcul de l'échauffement et de l'ablation de la structure impactée. Ces effets thermiques ont des conséquences en termes de propriétés mécaniques qui devront être prises en compte pour estimer la tenue de la structure et la probabilité d'interception du drone. Dans cet article, seuls les aspects thermiques sont évalués. Le code MoDeTheC repose sur une approche volumes finis isochore. Il intègre entre autres un solveur de dégradation thermique des matériaux, basé sur des réactions chimiques régies par des lois d'Arrhenius. Les effets de l'ablation sont calculés par un solveur dédié qui utilise une méthode de déformation du maillage pour suivre la dégradation surfacique des matériaux. Plusieurs cas d'application sont présentés. Le matériau est un composite aéronautique constitué de fibres de carbone et d'une résine époxy, dont les propriétés thermophysiques et thermochimiques ont été complètement caractérisées. Plusieurs scénarios ont été définis, en fonction de la taille et de la distance de l'objet visé, pour préciser les paramètres réalistes tels que la puissance laser et la taille de l'impact sur la structure. Ces trois scénarios sont simulés pour estimer l'échauffement et l'ablation d'un élément de drone soumis à ce chargement laser. On peut ainsi démontrer que l'ablation de la paroi dépend principalement de la densité de flux laser appliquée à sa surface. Le solveur actuel ne permet pas d'aller jusqu'au percement mais les résultats des simulations montrent que dans les conditions choisies, le percement d'une paroi en composite de faible épaisseur aurait lieu en un temps très court, ce qui serait compatible d'une interception en vol.

Évaluation thermo-énergétique d'un stockage actif à matériaux à changement de phase intégrant une modélisation adimensionnée

Judith Lukau M'Nyampara^{1,*}, Ryad Bouzouidja¹, José Luiz Lara Cruz², Cédric Le Bot¹

* ✉ : judith.lukau-mnyampara@u-bordeaux.fr

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

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

Mots clés : nombre adimensionnel, stockage d'énergie, comportement thermo-physique, code NOTUS

Résumé :

L'étude s'inscrit dans le cadre de la transition énergétique, où l'amélioration du pilotage thermique des bâtiments constitue un enjeu majeur. Les matériaux à changement de phase (MCP), capables de stocker et de restituer de la chaleur latente à température quasi constante, représentent une solution prometteuse pour le stockage thermique à basse température (0-100 degC). Leur intégration dans des systèmes fonctionnant selon un cycle journalier impose toutefois une analyse précise des charges thermiques et des transferts associés afin d'assurer une exploitation optimale. L'objectif principal est de concevoir, modéliser et valider un système actif de stockage thermique utilisant un réseau d'échangeurs de chaleur intégrés dans un réservoir contenant de la paraffine, MCP de référence pour les températures modérées. Le travail vise à caractériser les mécanismes de charge/décharge, à évaluer les performances sous sollicitations dynamiques et à identifier les paramètres influents sur l'efficacité énergétique du dispositif. L'approche combine simulation numérique et expérimentation afin d'obtenir une compréhension complète et cohérente du comportement thermo-physique du MCP en conditions réelles de fonctionnement. Les hypothèses structurantes concernent : (i) la modélisation du changement de phase solide-liquide par résolution de l'équation de la chaleur dans le code CFD Notus, avec discrétisation en volumes finis ; (ii) l'application de conditions aux limites de type Robin pour représenter l'interaction avec un fluide caloporteur ; (iii) la possibilité d'étendre l'analyse de la conduction pure à des configurations incluant la convection naturelle ; (iv) l'évaluation paramétrique à l'aide de nombres sans dimension (Fourier, Biot, Stefan) afin de généraliser les résultats ; (v) l'utilisation d'un prototype expérimental instrumenté permettant de comparer les énergies stockées et restituées aux prédictions numériques. L'ensemble constitue une base pour optimiser le dimensionnement et le fonctionnement de systèmes de stockage thermique à MCP.

Méthode inverse pour l'estimation des propriétés thermiques d'une cellule cylindrique de batterie

Houda Aboulfalah^{1,*}, Nicolas Blet¹, Natacha Darmet¹, Benjamin Remy¹, Reda Rabeh², Anas Elmaakoul²

* ✉ : houda.aboulfalah@univ-lorraine.fr

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

² LERMA, College of Engineering & Architecture, International University of Rabat

Mots clés : Modélisation thermique inverse, Méthode du fil chaud, Cellule Li-ion cylindrique, Transfert de chaleur radial, Quadripôles thermiques, Conductivité thermique, Capacité thermique, Estimation de paramètres.

Résumé :

Dans la continuité des travaux présentés lors du congrès SFT 2025, un modèle thermique inverse a été développé pour estimer à la fois la conductivité thermique radiale et la capacité thermique d'une cellule cylindrique de batterie électrique. L'objectif de l'étude globale est d'améliorer la compréhension et la modélisation du transfert de chaleur au sein de ces cellules électrochimiques, dans le but d'optimiser leur gestion thermique. L'approche expérimentale repose sur la méthode du fil chaud, où un fil chauffant est inséré au centre de la cellule dans l'espace existant de la structure en spirale. Un thermocouple est placé en contact avec le fil, tandis qu'un second thermocouple est positionné sur la surface externe de la cellule. Ces deux mesures de température servent alors à identifier, par méthode inverse, les cinq paramètres thermiques de la modélisation dynamique 1D radiale par quadripôles thermiques : capacité thermique du fil chauffant, résistance de contact entre le fil et la cellule, conductivité thermique radiale de la cellule, capacité thermique de la cellule, et un coefficient de transfert thermique par convection externe. À ce stade, l'expérience sur la cellule de batterie réelle n'a pas encore été réalisée, car elle nécessite une opération de découpe des deux extrémités de la cellule (pour éliminer les effets de bord et insérer le fil chauffant), qui implique une attention particulière de sécurité chimique. Les travaux présentés s'intéressent donc à une première phase de faisabilité de la méthode d'estimation sur différents matériaux de référence : PTFE (téflon), PVC, PEHD et le polystyrène. Pour valider la méthode sur ces différents matériaux, les capacités thermiques estimées sont comparées à des mesures par calorimétrie différentielle (DSC) et les conductivités thermiques à des estimations par la méthode du plan chaud. Ces développements ont pour but de révéler la méthode la plus pertinente (évaluation d'impédance et/ou de transmittance, temps de mesures, ...), par l'intermédiaire d'étude des sensibilités aux paramètres, pour conclure sur la robustesse du modèle inverse et de son estimation, avant l'application à des cellules de batterie réelles.

Modélisation hydro-thermique d'un système géothermique : l'échangeur air-sol et le sol environnant

Jian Lin^{1,*}, Monica Siroux¹, Wael Zeitoun, Vincent Magnenet

* ✉ : jlin@unistra.fr

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

Mots clés : Simulation numérique, géothermie, transfert hydro-thermique

Résumé :

Pour les systèmes géothermiques de surface, le transfert d'humidité de sol autour de l'échangeur a un impact important sur le transfert thermique du système. Cependant, dans la littérature, très peu d'études ont été menées sur la modélisation du transfert thermique et hydrique du sol autour des systèmes géothermiques. Notre étude se concentre sur le développement et la mise en œuvre d'une simulation numérique couplée hydro-thermique pour les échangeurs air-sol (Earth-Air Heat Exchangers, EAHE), en utilisant l'environnement MOOSE (Multiphysics Object-Oriented Simulation Environment). Elle passe en revue divers modèles existants pour les systèmes géothermiques peu profonds, en soulignant leur focalisation sur le transfert de chaleur ou sur les transferts couplés de chaleur et d'humidité. La simulation couplée développée dans ce travail intègre des formulations mathématiques détaillées et prend en compte les propriétés du sol et de l'air, les conditions aux limites ainsi que les conditions initiales, afin de représenter fidèlement des scénarios réels. Un effort significatif a été consacré au développement et à la validation de l'algorithme de simulation, qui a montré une bonne concordance avec les données expérimentales, confirmant ainsi la fiabilité du modèle pour prédire le comportement des EAHE.

Modélisation macroscopique du comportement thermique d'un module de batterie de véhicules électriques

Mohamed Sokore^{1,*}, Nicolas Blet¹, Natacha Darmet¹, Benjamin Remy¹

* ✉ : mohamed.sokore@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Modélisation nodale, Modélisation éléments finis, Analyse thermique, Modules de batterie

Résumé :

Les batteries lithium-ion sont largement utilisées dans les véhicules électriques et systèmes de stockage d'énergie en raison de leur compatibilité environnementale, de leur haute densité de stockage énergétique, de leur excellente performance de cycle et de l'absence d'effet de mémoire. Malgré ces avantages, la gestion thermique des batteries lithium-ion peut être encore améliorée lors des conditions extrêmes et abusives qui impliquent la dégradation des composants actifs de la batterie et par la suite l'emballement thermique. Actuellement, le défi majeur dans la production de batteries haute performance est le développement de stratégies efficaces permettant d'éviter ou de limiter la propagation de l'emballement thermique afin de prolonger leur durée de vie et garantir leur sécurité. L'ambition du projet MATICS, réunissant un consortium complémentaire d'acteurs français (Saint-Gobain Recherche, Enersens, Vekor, Lemta) est ainsi de concevoir de nouveaux designs de modules de batteries électriques à cellules pouch intégrant des matériaux innovants inter-cellules permettant de freiner, voire d'éviter, la propagation d'un éventuel emballement thermique au sein du module, afin d'en garantir une plus grande sécurité. L'objectif de l'étude présentée est d'analyser, à travers une approche numérique de modélisation macroscopique, le comportement thermique dynamique en régimes normal et dégradé d'un module de batterie. Pour prédire ce comportement, et dans un souci d'inter-validation des résultats, un modèle 1D nodal (Matlab) et un modèle 2D par éléments finis (Comsol MultiPhysics), utilisant des cas de génération de chaleur dissipée lors d'une charge rapide, ont été développés. Des études sur les différents paramètres du module (géométrie, design, propriétés thermiques et mécaniques des matériaux) sont présentées pour analyser les phénomènes prépondérants. Le modèle 1D offre un outil rapide de prédimensionnement tandis que le modèle 2D permet de prendre en compte des effets thermiques dissymétriques. Des perspectives de développement sur les phénomènes thermomécaniques sont également abordées.

Simulation numérique directe des écoulements gas-particules dans les récepteurs solaires de tour à concentration

Alexandre Labat^{1,*}, Françoise Bataille¹, Samuel Mer¹, Adrien Toutant¹

* ✉ : alexandre.labat@univ-perp.fr

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

Mots clés : thermique, simulation numérique, direct numerical simulation, front-tracking, solar receiver, fluidized bed

Résumé :

Pour optimiser les performances des tours solaires à concentration, les fluides caloporteurs usuels peuvent être remplacé par des particules d'olivine, capables de transporter la chaleur à des températures supérieures à 1000 degC. Fluidisées par une injection d'air, ces particules acquièrent un comportement analogue à celui d'un fluide. Elles évacuent la chaleur des parois du récepteur solaire, tandis que la fluidisation assure une homogénéisation thermique efficace. Afin d'étudier les mécanismes de transferts thermiques dans ces récepteurs, nous réalisons des simulations numériques résolues à l'échelle des particules de lits fluidisés anisotherme. L'objectif est d'analyser les transferts thermiques dans un lit fluidisé chauffé par ses parois. Le modèle est basé sur une formulation monofluide des équations de Navier-Stokes et de l'énergie. Les interfaces sont suivies par une méthode Front-Tracking : un maillage lagrangien mobile décrit la surface des particules, puis est projeté sur un maillage eulérien pour y déterminer les propriétés monofluides. Les équations de conservation sont résolues sur ce maillage eulérien, tandis que le maillage lagrangien est advecté à chaque pas de temps selon la vitesse imposée à la surface des particules. La rigidité des particules est assurée par une pénalisation visqueuse et la température à leur surface est imposée via une méthode ghost-fluid. La température interne des particules est supposée homogène. La simulation numérique est initialisée avec des particules à température fixe jusqu'à stabilisation de la dynamique de l'écoulement. Les transferts thermiques sont pris en compte une fois le régime statistiquement stationnaire atteint. Les échanges thermiques pariétaux sont finalement étudiés en fonction de la vitesse de fluidisation, de la distance à la parois et de la hauteur dans le lit.

Une approche Monte Carlo pour l'analyse de sensibilité d'un système de pompe à chaleur automobile

Chrisle Joseph Charls^{1,*}, Abdelhamid Kheiri², Benjamin Remy², Thierry Boileau², Jean-Michel Fiard¹

* ✉ : chrisle.joseph-charls@ampere.cars

¹ Renault Group AMPERE

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

Mots clés : Analyse de sensibilité, systèmes de pompe à chaleur, modélisation 1D, écoulement diphasique

Résumé :

Objectif de l'étude : Déduire l'incertitude des paramètres d'entrée et de sortie d'un système de pompe à chaleur automobile comportant plusieurs échangeurs thermiques contrôlés indépendamment. Contexte : Les systèmes de pompe à chaleur automobile constituent une tendance croissante sur le marché des véhicules électriques (VE) en raison de l'amélioration de l'efficacité énergétique, ce qui se traduit par un gain d'autonomie des VE. Dans les VE, les pompes à chaleur sont généralement interconnectées entre deux charges thermiques principales : la batterie et l'habitacle, tout en interagissant avec l'environnement ambiant. Par conséquent, ces systèmes doivent fonctionner en plusieurs modes et peuvent avoir plusieurs échangeurs en rejet ou en absorption de chaleur actifs tout au long de la période de conduite afin de répondre aux demandes thermiques variables du véhicule. Cela entraîne la présence de plusieurs boucles de régulation agissant simultanément sur différents composants du système de pompe à chaleur. Cette complexité augmente la difficulté à déterminer l'influence de chaque paramètre de dimensionnement et d'exploitation sur les performances globales du système. Méthodologie : Afin de comprendre l'influence de chaque paramètre d'entrée sur les paramètres de sortie d'un modèle thermique 1D d'un système de pompe à chaleur automobile, un modèle existant développé sur une plateforme de simulation telle qu'AMESIM sera utilisé comme modèle de test. Ce modèle sera vérifié pour sa corrélation avec les données expérimentales. Pour l'analyse de sensibilité, des paramètres tels que la masse du fluide frigorigène, la perte de charge entre les lignes haute et basse pression, le volume du système et d'autres paramètres de dimensionnement seront introduits avec des variations aléatoires intentionnelles et analysés pour leur influence sur les réponses stationnaires et transitoires des paramètres de performance du système. Les principaux paramètres de performance surveillés incluent le coefficient de performance (COP) et la puissance totale du système sous diverses conditions de charge en utilisant le fluide frigorigène R1234yf. Résultats : Les résultats potentiels permettront d'identifier l'étendue des incertitudes sur les paramètres de sortie du modèle de pompe à chaleur induites par les incertitudes contrôlées introduites sur les paramètres de dimensionnement et d'exploitation choisis. Une comparaison des sensibilités du système avec et sans boucles de régulation PID sera également effectuée afin d'analyser la différence de comportement du modèle. La compréhension de ces sensibilités contribue à optimiser les stratégies de dimensionnement et de contrôle pour garantir des performances robustes de la pompe à chaleur dans tous les modes de fonctionnement d'un VE.

Une approche pseudo-analytique basée sur la formulation « improved lumped » pour la reconstruction transitoire du flux thermique en écoulement dispersé sous conditions de type APRP

Joao Marcelo Maris Da Silva Filho^{1,*}, Michel Gradeck¹, Alexandre Labergue¹, Arthur Vieira Da Silva Oliveira², Juan Esteban Luna Valencia³, Tony Glantz³

* ✉ : joao-marcelo.maris-da-silva-filho@univ-lorraine.fr

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

² Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, Brazil

³ Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection

Mots clés : Flux thermique transitoire, conduction de la chaleur, reconstruction du flux thermique, formulation improved lumped, écoulement dispersé, APRP

Résumé :

Ce travail présente une méthode pseudo-analytique pour l'estimation du flux thermique transitoire à la paroi interne d'un tube chaud soumis à un renoyage, dans des conditions de type APRP. L'approche combine une formulation improved lumped avec la résolution de l'équation de la chaleur à variation axiale, en conservant partiellement les effets des gradients radiaux, avec un faible coût de calcul. Le modèle a été évalué avec des données d'écoulements dispersés obtenues dans l'installation COLIBRI. Les profils de flux thermique prédits sont cohérents avec ceux obtenus par une méthode conventionnelle, avec des écarts résiduels principalement liés à l'estimation des valeurs pics. Bien que limitée aux conditions d'écoulements dispersés, cette étude constitue une étape importante vers la reconstruction du flux thermique dans des expériences de renoyage.

Une Nouvelle Stratégie de Refroidissement des Batteries Lithium-Ion par stockage de chaleur dans des Matériaux à Changement de Phase

Mustapha Faraji^{1,*}

* ✉ : farajimustapha@yahoo.fr

¹ Fsac- Université Hassan II Casablanca

Mots clés : MCP, Batterie Lithium-ion, Véhicules électriques. Refroidissement. Stockage de chaleur latente. Fusion

Résumé :

Le contrôle thermique des batteries Lithium-Ion est crucial pour le futur des véhicules électriques à mesure que ces batteries deviennent plus puissantes et plus compactes, et que la demande en performance continue de croître. Dans ce sens, on aborde une étude numérique de refroidissement des batteries Lithium-Ion par convection naturelle combinée au stockage de chaleur dans un matériau à changement phase (MCP). Les MCP offrent une solution prometteuse car ils peuvent absorber et stocker d'importantes quantités d'énergie thermique lors de la fusion. Cela permet de réguler efficacement la température des batteries et améliorer leur efficacité de refroidissement sans recourir au refroidissement actif. Un modèle mathématique basé sur le bilan thermique en utilisant la méthode enthalpique est développé. Les équations gouvernantes obtenues sont discrétisées par la méthode des volumes de contrôle et résolues par l'algorithme TDMA. Un code de calcul FORTRAN est élaboré et une série d'investigations numériques est effectuée. Le comportement du système est analysé et l'efficacité du MCP comme refroidisseur des batteries est démontrée.

3E analysis of PCM applied in building walls in the climatic conditions of Strasbourg

Qianwen Tan^{1,*}, Monica Siroux¹

* ✉ : qianwen.tan@insa-strasbourg.fr

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

Mots clés : Exergy ; Exergoeconomics ; Phase change materials (PCM) ; Wall ; Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB)

Résumé :

Parmi les différentes technologies visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans les enveloppes bâties apparaît comme l'une des approches les plus prometteuses pour atteindre les objectifs des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (NZEB). Toutefois, le concept de NZEB a récemment évolué au-delà de la seule évaluation de la performance énergétique, en intégrant également des dimensions exergétique et économique. Dans ce contexte, les analyses exergétiques et économiques permettent une évaluation plus complète et plus pertinente des murs intégrant des MCP. Cette étude examine les performances énergétique, exergétique et économique (3E) d'un mur intégrant un MCP, dans le contexte climatique de Strasbourg. Les effets de la température maximale de fusion, de l'épaisseur et de la position du MCP sur les performances 3E sont analysés et discutés. Les résultats obtenus offrent une compréhension approfondie et une perspective élargie de la contribution des MCP à la réalisation des objectifs des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle.

A First-Principles Framework Based on Virtual Crystal Approximation for Calculating the Lattice Thermal Conductivity of Doped Si_{1-x}Ge Alloys

Mingming Guo^{1,*}, Laurent Chaput¹, Fabien Pascale¹

* ✉ : mingming.guo@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Lattice thermal conductivity, Virtual Crystal Approximation, Doped Si_{1-x}Ge Alloys, DFT Calculations

Résumé :

Thermoelectric materials convert waste heat directly into electricity, and their efficiency is strongly influenced by low lattice thermal conductivity. Doping is a widely used strategy to reduce lattice thermal conductivity and enhance thermoelectric performance. However, accurately predicting the thermoelectric properties of doped materials using first-principles calculations is challenging due to the need for large supercells to model the disorder introduced by doping. The Virtual Crystal Approximation (VCA) provides a computationally efficient alternative by treating the doped system as an effective medium with averaged properties, thus avoiding the need for large supercells [1]. Here, we present a first-principles framework based on VCA to calculate the lattice thermal conductivity of doped Si_{1-x}Ge alloys. This framework combines Density Functional Theory (DFT) with phonon transport calculations using Phonopy [2, 3] and Phono3py [2, 4] packages, allowing for accurate predictions of lattice thermal conductivity in doped systems. We validate our framework by comparing the calculated lattice thermal conductivity of Si_{1-x}Ge alloys with experimental data, demonstrating good agreement across a range of doping concentrations. Our results show that the VCA-based approach effectively captures the impact of doping on phonon scattering and thermal transport properties. This framework provides an effective approach for improving and design high-performance thermoelectric materials through doping strategies.

A novel model for ejector performance mapping across the full operating range

Vu Hai La^{1,2,*}, Benoit Michel, Rémi Revellin, Hai Trieu Phan²

* ✉ : lavuhai2001@gmail.com

¹ CEA Grenoble

² CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

Mots clés : Ejector, ammonia water mixture, Absorption cycle

Résumé :

The global rise in temperature raises non-negligible concerns regarding the performance of absorption-based cycles. Recently, multiple studies have shown the ability to mitigate harsh temperature conditions through the use of an ejector. The ejector enables an increase in pressure in certain components, such as the condenser or the absorber, in order to facilitate heat rejection. For this reason, an ejector has been designed and fabricated. The next step is to develop a proper numerical model to investigate the cycle incorporating the ejector. In the literature, state-of-the-art simplified models fail to properly assess the designed ejector, as its operating conditions deviate significantly from typical ones. Thus, a novel modeling approach must be introduced. The current work therefore consists of, first, defining a novel approach to quantifying the performance of such an ejector, and second, developing a model that is able to reproduce its performance curve as a function of the desired operating conditions.

Assessment of CATHARE-3 3D module on TRIGA reactor

David Giron Ceballos^{1,*}, Laura Matteo¹, Franck Morin¹, Frederic Nguyen¹

* ✉ : david.gironceballos@cea.fr

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

Mots clés : Nuclear energy, Natural convection, CATHARE-3, Heat production, Passive safety, Thermal-hydraulic simulations, Multidimensional flow

Résumé :

Le secteur industriel est le deuxième contributeur aux émissions de CO₂ en France après les transports. Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 nécessite de prioriser la décarbonation, en particulier pour les procédés ayant des besoins thermiques inférieurs à 150 °C, qui représentent plus de 50 % de la consommation thermique industrielle. Des exemples incluent les réseaux de chaleur, l'électrolyse de l'hydrogène et la production de chlorure de vinyle. L'énergie nucléaire, en particulier les petits réacteurs modulaires (SMR), constitue une solution prometteuse bas carbone. Le concept de SMR R-CALIN (Reactor CALogène à INertie renforcée) vise une production de chaleur flexible avec un haut niveau de sûreté passive. Dans le cadre du projet SMR R-CALIN, des simulations thermo-hydrauliques sont essentielles pour étudier les conditions normales et accidentelles. Le code CATHARE-3 est largement utilisé en raison de sa base de validation et de son efficacité. Le design R-CALIN présente un circuit secondaire ouvert fonctionnant par convection naturelle, avec une grande inertie thermique améliorant significativement la sûreté. Le recours à la circulation naturelle et cette grande inertie thermique augmentent le niveau de sûreté, au point qu'aucun événement physique réaliste (ou combinaison d'événements) ne peut conduire à un accident grave. Cependant, cela introduit des contraintes sur la modélisation des phénomènes physiques. En raison du caractère intrinsèquement tridimensionnel de l'écoulement, une approche 1D classique ne permet pas de capturer les phénomènes dans le volume secondaire. CATHARE-3 inclut une adaptation 3D des équations de conservation, validée pour des écoulements 3D typiques des REP actuels, tels que la cuve du réacteur et les simulations de sous-canaux. Toutefois, un manque de validation a été identifié pour les configurations à volume ouvert comme la piscine secondaire de R-CALIN. Dans ces géométries, les parois et structures internes restent éloignées, ce qui rend la diffusion numérique introduite par le code potentiellement significative par rapport à la diffusion physique. Cette étude vise à valider le module 3D de CATHARE-3 pour la convection naturelle en milieu ouvert en utilisant le réacteur TRIGA du JSI. Un modèle 1D préliminaire a fourni des résultats de référence, suivi d'un modèle mixte 1D/3D validé par comparaison avec des données expérimentales. Le modèle 1D reproduit les tendances générales mais reste limité pour la diffusion thermique en raison de la nodalisation 1D de la piscine. Le modèle 3D améliore les résultats mais ne parvient pas à reproduire les données expérimentales, et le modèle de diffusion s'avère inadapté à la géométrie proposée. Les travaux futurs incluent un modèle 3D complet sous CATHARE-3 avec activation du modèle de diffusion et une comparaison avec TrioCFD, dans le but d'étendre le domaine de validation de CATHARE-3 à d'autres concepts de SMR à volume ouvert.

Etude de la validité d'un nouveau modèle théorique de prédiction de la conductivité thermique et de la viscosité pour des calculs CFD.

Oriana Haddad^{1,*}, Ignace Yapi¹, Jean-Philippe Passarello¹, Mounir Ben Amar¹

* ✉ : oriana.haddad@lspm.cnrs.fr

¹ Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (LSPM), CNRS, UPR 3407, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France

Mots clés : conductivité thermique, viscosité, modèle théorique prédictif, calculs CFD, échangeur de chaleur, nanofluide

Résumé :

Un modèle théorique basé sur des considérations de thermodynamique statistique hors équilibre a récemment été développé par notre équipe Yapi et al. (2025) pour prédire la conductivité thermique et la viscosité des fluides simples (gaz rares) et des fluides complexes (eau, nanofluide). Ce modèle permet de générer des pseudo-données expérimentales sans paramètres ajustables. Les propriétés thermophysiques des nanofluides sont calculées avec le modèle théorique de Yapi et al. (2025) et sont comparées aux données obtenues à partir de modèles théoriques conventionnels (Maxwell, Hamilton - Crosser,...), de corrélations empiriques et de mesures issues de la littérature. Les propriétés calculées sont ensuite intégrées à des simulations CFD pour prédire les coefficients de transfert de chaleur convectif, de friction et de performance au sein d'un échangeur de chaleur classique en utilisant un nanofluide (eau/Al₂O₃) comme fluide caloporteur. Les interactions de type solide/liquide ainsi que les effets de taille des particules sont étudiés. Références I. Yapi, O. Haddad, M. Ben Amar, J. P. Passarello, (2025). Predicting transport properties of simple fluids using an extended FMSA model and a Mode-Coupling Theory. Fluid Phase Equilibria, 595, 114426. I. Yapi, O. Haddad, M. Ben Amar, J. P. Passarello, (2025, May). Predicting thermal conductivity and associated autocorrelation function for simple fluids. In International Conference PPEPPD 2025-Properties and Phase Equilibria for Product and Process Design.

Étude et modélisation du transport des phonons dans les alliages par la méthode de Monte Carlo ; applications au calcul de la conductivité thermique du SiGe et l'InGaAs.

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

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

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

Mots clés : semi-conducteurs, pompe-sonde, non-Brownien, anormaux

Résumé :

La compréhension des phénomènes de transport de la chaleur dans les objets micro et nanostructurés, ainsi que le contrôle des propriétés thermiques dans les alliages semi-conducteurs, sont deux enjeux cruciaux. En effet, s'il est désormais clairement établi que dans les semi-conducteurs usuels tels que le Silicium ou le Germanium la notion de dimensionnalité impacte fortement les transferts thermiques, ces questions sont encore en partie ouvertes pour les alliages de semi-conducteurs. Pour des films submicroniques des expériences récentes utilisant des techniques "pompe-sonde" ont montré que des régimes de transport "anormaux" étaient observables. Ce type de régime non-Brownien, dit balistique-diffusif, est à l'origine de plusieurs travaux récents tant théoriques qu'appliqués. Dans ce contexte, nous avons étudié la conductivité thermique des alliages de SiGe et d'InGaAs. Nos travaux reposent sur le développement de modèle et de diverses méthodes de simulation numérique avec les données expérimentales disponibles dans la littérature. Les applications de ces travaux concernent l'amélioration de l'efficacité des futurs dispositifs électroniques avancés ou encore la récupération de l'énergie grâce aux matériaux thermoélectriques.

Méthode Monte Carlo par échantillonnage statistique de raies pour des estimations radiatives non biaisées dans les incendies

Aayush Jatin Shah^{1,*}, Pascal Boulet, Olivier Farges¹, Yaniss Nyffenegger-Péré¹

* ✉ : aayush-jatin.shah@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : méthode de Monte Carlo, Rayonnement raie par raie, feux et incendies

Résumé :

Le transfert radiatif joue un rôle essentiel dans la dynamique des incendies, mais reste l'un des aspects les plus difficiles à modéliser avec précision. Des travaux récents, menés dans le cadre de l'initiative collaborative MacFP, ont montré des progrès prometteurs grâce à des approches de type Monte Carlo et des méthodes spectrales fines. En utilisant une approche Monte Carlo différente, nos travaux visent à fournir une solution de référence pour les processus de transfert radiatif pertinents dans les scénarios de propagation d'incendie, en prenant en compte la spectroscopie détaillée des gaz. Notre approche élimine les biais de discrétisation conventionnels, tant pour le transport de photons que pour la modélisation du rayonnement des gaz. Les trajectoires des photons sont suivies de manière continue, indépendamment de tout maillage de calcul, évitant ainsi les limitations des méthodes classiques basées sur les cellules. Pour la modélisation spectrale, l'émission des gaz est représentée par une approche raie par raie (Line-By-Line, LBL) fondée sur la base de données HITEMP, capturant la structure détaillée des spectres gazeux. Afin de surmonter le coût prohibitif du calcul des coefficients d'absorption à toutes les positions et fréquences, une stratégie d'échantillonnage de raies (Line Sampling) est utilisée. Cette technique, appelée Monte Carlo-LBL, échantillonne une raie spectrale par position et par fréquence, réalisant un couplage non biaisé entre transfert radiatif et spectroscopie des gaz, comme cela a été préalablement validé dans des études de modélisation climatique. La méthode sera décrite en tant qu'étape clé dans notre description du rayonnement des flammes. Dans le cadre du benchmark MacFP, une configuration de flamme de méthanol est étudiée à partir de champs de température et de concentration générés par une simulation FireFOAM. Notre solveur Monte Carlo-LBL produit des instantanés de champs radiatifs à haute résolution, directement comparables avec les résultats des autres modèles participants. Les résultats fournissent un jeu de données de référence précieux pour évaluer la précision des modèles et contribuent à établir un benchmark sans biais pour le transfert radiatif dans les simulations d'incendie.

Towards Electrification of Biomass Pyrolysis in Fluidized Bed for Bioenergy Generation

Abderraouf Adjizi^{1,*}, Isabelle Navizet¹, Enrica Masi, Ali Ozel, Amine Chadil, Jamal Chaouki

* ✉ : abderraouf.adjizi2@univ-eiffel.fr

¹ Université Gustave Eiffel

Mots clés : Electrification, Biomass, Pyrolysis, Fluidized bed.

Résumé :

This study investigates the potential of numerical simulation to optimize bio-oil production through biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. The main objective is to electrify the pyrolysis process by employing microwave-assisted heating as a sustainable alternative to conventional fossil-fuel-based heating, advancing low-carbon strategies in bioenergy production. Eulerian-Eulerian simulations were conducted to represent a polydisperse mixture of inert sand and reactive biomass particles fluidized by an air stream. Biomass decomposition kinetics were described using the Ranzi reaction mechanism, and all numerical experiments were performed with the open-source CFD platform OpenFOAM. The objective is to provide a comparative numerical analysis of biomass pyrolysis under two heating modes-conventional and microwave-highlighting their respective effects on product yield and quality. The calibration study on the models and their parameters was carried out to ensure both the physical accuracy of the numerical models and the correct hydrodynamic behavior of the fluidized bed. Subsequently, a validation study was performed to confirm that the proposed configuration reproduces the key physical phenomena governing biomass pyrolysis under conventional heating and establishes the possibility of performing a detailed analysis of how operating conditions and material properties influence reactor performance. The results highlight the strong coupling between the hydrothermodynamic behavior of the fluidized bed, the physicochemical properties of the biomass, and the yields of the resulting products. A uniform and well-controlled temperature field within the reactor is identified as a critical factor for achieving efficient biomass conversion and optimizing bio-oil production.

Validité de la similitude de Froude pour un feu de cavité représentatif d'une façade ventilée - étude numérique

Cappon Laurine^{1,*}

* ✉ : laurine.cappon@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Similitude de Froude, Feu de cavité, Simulation numérique

Résumé :

Les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur dans les façades ventilées constituent un risque de propagation accru vers les étages supérieurs lors d'un incendie via la cavité d'air entre l'isolant et le revêtement extérieur. Il est donc essentiel d'étudier la propagation du feu dans ces systèmes. Les essais à taille réelle étant difficiles à réaliser et très coûteux, il est courant de les conduire à échelle réduite. La question de la similitude entre ces échelles est alors centrale : les résultats obtenus à petite échelle peuvent-ils être extrapolés à des configurations réelles ? La similitude de Froude est la méthode classiquement utilisée pour mettre à l'échelle les expériences de feu. Elle repose sur la conservation du nombre de Froude entre la petite et grande échelle. Elle suppose que l'écoulement reste suffisamment turbulent et que les forces de flottabilité dominent. En notant l le rapport d'échelle géométrique, cette approche implique que la puissance varie en $l^{(5/2)}$, le temps en $l^{(1/2)}$ et la vitesse en $l^{(1/2)}$, tandis que la température est théoriquement conservée. Ces relations permettent en principe de comparer directement les résultats obtenus à différentes échelles. L'objectif de ce travail est d'évaluer la validité de la similitude de Froude appliquée à un feu de cavité, représentatif d'une façade ventilée. Le logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS 6.7.0) a été utilisé pour simuler un feu entre deux parois incombustibles verticales parallèles avec un brûleur linéaire comme source. Le cas de référence (échelle 1) consiste en deux parois de 15 cm × 50 cm × 0,5 cm en silicate de calcium, séparées par une cavité de 2 cm ou 8 cm et une puissance de feu de 9 kW. Un maillage de 4 mm est utilisé. Deux échelles supplémentaires sont simulées en appliquant successivement un facteur d'échelle de 2, avec les HRR correspondants selon les lois de Froude. La vitesse des gaz, la hauteur de flamme, les flux de chaleur radiatif et convectif ainsi que la température des parois ont été mesurés à trois hauteurs, puis comparés entre échelles selon les lois de similitude. Pour les flux mesurés aux parois, plusieurs lois ont été utilisées : l^0 et $l^{(1/2)}$, afin d'identifier une mise à l'échelle plus adaptée aux transferts thermiques en cavité confinée. Les résultats montrent que la similitude de Froude est satisfaisante pour certaines grandeurs, notamment pour les vitesses de gaz, avec des écarts relatifs entre échelles de 6 % en moyenne. En revanche, les écarts sont plus élevés pour les grandeurs thermiques des parois. La loi $q'' l^{(1/2)}$ donne un écart plus faible que la loi $(q'' l)^0$. Par exemple pour le flux radiatif, l'écart est de 45% contre 93%. Ces résultats indiquent que la similitude de Froude seule ne suffit pas à reproduire fidèlement les grandeurs thermiques aux parois dans ces configurations. Certains phénomènes thermiques, notamment les échanges radiatifs entre parois, ne sont pas pris en compte dans les lois d'échelle de Froude.

Thème 8

Phénomènes de changement de phase et écoulements multiphasiques

Caractérisation dynamique d'un capteur de flux de chaleur micro-fabriquée	78
Caractérisation expérimentale d'écoulements bouillants intervenant dans les récepteurs solaires à Génération Directe de Vapeur	79
Détermination de la fonction de densité de probabilité de pulvérisation d'une buse à cône creux en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC)	80
Effet de la coalescence des gouttes sur la prédiction du flux thermique en Dispersed Flow Film Boiling	81
Etude du transfert de chaleur en régimes mouillants par ombroscopie et thermographie IR lors d'impacts de gouttes : effet de la mouillabilité de la surface	82
Étude expérimentale et numérique de la fusion de l'alliage Zamak (Zn-4Al) utilisé comme matériau à changement de phase (MCP) dans une enceinte fermée en acier inoxydable	83
Lors de la conception des nouveaux réacteurs, des dispositifs sont intégrés pour limiter la formation du corium et pour en assurer la gestion en cas d'accident grave.	84
Melting droplet on an inclined plane	85
Caractérisation thermo-structurale de paraffines commerciales : comparaison entre formes vrac et microencapsulées	86
Changement de phase : une cinétique assimilable à un essai de fluage ?	87
Comparative Study of Photovoltaic Cooling Techniques Under Identical Conditions	88
Étude de la stabilisation de l'ébullition convective par matrice de picots macroscopiques à l'aide de la thermométrie de luminophores bidimensionnelle	89
Étude des transferts de chaleur et de masse lors de l'évaporation d'une goutte sur une paroi : influence des propriétés du substrat	90
Étude et Modélisation Numérique du refroidissement par immersion en application aux packs batteries Lithium-ion	91
High-Temperature Phase Change Dispersions (PCDs) as Advanced Heat Transfer Fluids ; Development and Characterisation	92
Refroidissement de composant électronique par immersion avec injections de bulles d'air.	93
Study of the Boiling Process in Electric Jet Boilers – Optimization of Equipment Durability Based on Experimental Data Analysis and Multiphysics CFD Process Modeling	94
Thermal convection and melting dynamics in a Phase Change Material (PCM) embedded in a porous solid foam	95
Vers la caractérisation des oscillations induites par changement de phase dans un tube capillaire	96

Caractérisation dynamique d'un capteur de flux de chaleur micro-fabriquée

Himanshi Kharkwal^{1,2,*}, Eric Gavignet², Sébastien Euphrasie¹, Syed Shah², Abbas Hamieh², Magali Barthes^{1,2}, Lounès Tadrist³, Francois Lanzetta²

* ✉ : himanshi.kharkwal@femto-st.fr

¹ Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

² Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France

³ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

Mots clés : Ébullition, microfabrication, capteur de flux thermique, mesures transitoires

Résumé :

Objectifs : Le transfert thermique est essentiel dans de nombreux processus industriels, comme le refroidissement, les échangeurs thermiques ou la production d'électricité. Malgré des recherches approfondies, les méthodes réellement performantes pour optimiser le transfert thermique tout en limitant les pertes demeurent encore limitées. Parmi elles, l'ébullition, un mécanisme passif qui permet d'améliorer le transfert thermique, suscite un intérêt considérable en raison notamment des effets de la micro-convection induite par les bulles et de la conduction transitoire. Cependant, la dynamique complexe et rapide de l'ébullition rend toute mesure précise difficile. Cette étude a pour objectifs de développer un capteur capable de mesurer avec précision les températures et le transfert de chaleur à l'échelle de la bulle, dans le but d'améliorer notre compréhension de la physique de l'ébullition. **Méthode :** Un capteur capable à la fois de générer des bulles en une localisation contrôlée et de mesurer les températures et le flux thermique local a été développé à l'aide de techniques de micro-fabrication telles que la photolithographie, le dépôt physique en phase vapeur, la gravure ionique réactive profonde, le collage et l'ablation laser. Ce dispositif, appelé « micro-ébulliomètre », est composé d'un système de chauffage intégré et de sondes. Il a été caractérisé de manière dynamique dans quatre conditions thermiques différents : chauffage par rayonnement laser, chauffage par convection (air chaud), dépôt d'une gouttelette d'eau sur la partie sensible du capteur et changement de phase (ébullition) sur un seul site de nucléation. Des montages expérimentaux dédiés ont été mis en place pour chaque environnement afin de garantir des mesures fiables et comparables. **Résultats :** Le micro-ébulliomètre fabriqué s'est révélé efficace dans tous les environnements testés, avec des temps de réponse allant de 40 ms à 250 ms, en fonction de la méthode de caractérisation et des niveaux d'énergie injectés. Certains de ces résultats ont été corroborés par un volet numérique. Une analyse expérimentale comparative avec un capteur de flux thermique commercial (CAPTEC) a aussi permis de confirmer une efficacité accrue du capteur développé en termes de temps de réponse et de sensibilité. Ces résultats constituent une preuve de concept de notre capteur et permettront de proposer un nouvel outil fiable pour étudier les phénomènes de transfert de chaleur associés en particulier à l'ébullition, mais aussi associés à d'autres systèmes thermiques, aux petites échelles difficilement accessibles avec des capteurs usuels.

Caractérisation expérimentale d'écoulements bouillants intervenant dans les récepteurs solaires à Génération Directe de Vapeur

Samuel Mer^{1,*}, Israel Aguilera-Cortes¹, Adrien Toutant¹

* ✉ : samuel.mer@univ-perp.fr

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

Mots clés : ébullition convective, récepteur solaire, expérimentation

Résumé :

Les technologies solaires thermiques à concentration (CST) constituent une alternative renouvelable prometteuse aux sources d'énergie conventionnelles. Elles consistent à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroirs. L'élévation de température ainsi obtenue permet d'utiliser l'énergie thermique produite soit pour la production d'électricité dans des centrales solaires à concentration (Concentrated Solar Power, CSP), soit directement dans des procédés industriels nécessitant de la chaleur (Solar Heat for Industrial Processes, SHIP). Dans les systèmes classiques, l'énergie solaire absorbée est extraite par un fluide caloporteur (huiles ou sels fondus), ce qui présente des inconvénients environnementaux, corrosifs et liés au remplacement. La Génération Directe de Vapeur (GDV) au sein des capteurs est donc explorée comme une option plus durable. Une boucle expérimentale, nommée ConBo, a été développée au laboratoire PROMES. Elle permet l'étude des écoulements diphasiques bouillant eau-vapeur dans un tube horizontal ou légèrement incliné de 50 mm de diamètre interne. L'eau est chauffée par induction jusqu'à la vaporisation, suivie d'une section transparente de visualisation où les régimes d'écoulement sont enregistrés, donnant accès à des variables quantitatives telles que la vitesse et la fraction de vide. Le dispositif comprend des sondes de température dans le fluide et sur la paroi du tube ainsi que des capteurs de pression différentielle, de débit et d'inclinaison. Le débit massique, la température d'entrée, le flux thermique et l'inclinaison du tube peuvent être ajustés. Les données issues des capteurs ont été utilisées pour déterminer les coefficients locaux de transfert thermique et les différences de température verticale, tandis que les images ont permis de classifier les régimes d'écoulement. Plus de 300 expériences ont été réalisées. La comparaison des coefficients d'échange avec les corrélations disponibles dans la littérature a montré un accord insuffisant, ce qui a conduit au développement d'une nouvelle corrélation plus précise. La distribution de température dans le solide a également été analysée, révélant un effet contre-intuitif : le haut du tube est la plupart du temps plus froid que le bas. Cela résulte de la formation intermittente d'un film liquide sur la paroi supérieure. Celui-ci améliore significativement le transfert thermique local et réduit donc la température de la paroi. Un modèle mécanistique développé dans le cadre de ce travail corrobore ces observations.

Détermination de la fonction de densité de probabilité de pulvérisation d'une buse à cône creux en utilisant le critère d'information d'Akaike (AIC)

Ilyas Sellami^{1,*}, Antonin Robinet¹, Nicolas Rimbert², Khaled Chetehouna¹, Ludovic Lamoot¹

* ✉ : ilyas.sellami@insa-cvl.fr

¹ INSA Centre Val de Loire

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

Mots clés : Spray, PDF, PDA, taille de gouttelettes, critère d'information d'Akaike, incendie

Résumé :

Les gouttelettes d'un spray sont caractérisées par des distributions statistiques qui reflètent la nature stochastique de leur formation et de leur fragmentation. Ces distributions sont étroitement liées à la physique gouvernant la génération et l'évolution des sprays. Cette étude vise à évaluer systématiquement diverses lois d'ajustement pour déterminer la fonction de densité de probabilité (PDF) de pulvérisation d'un brouillard d'eau généré par une buse mono-fluide à cône creux. L'anémométrie à phase Doppler (PDA) est utilisée conjointement avec l'imagerie à haute vitesse afin de caractériser finement la dynamique du spray. L'analyse des distributions de taille et de vitesse des gouttelettes révèle qu'aucun modèle mathématique unique ne représente de manière précise l'ensemble des données expérimentales. Sur la base du critère d'information d'Akaike (AIC), les résultats montrent que la dépendance habituelle à des distributions log-normales et de Weibull en dynamique des fluides numérique (CFD) peut s'avérer simpliste et compromettre la précision des simulations. L'adoption de distributions stables ou de modèles plus flexibles, tenant compte de l'asymétrie (skewness) et de l'aplatissement (kurtosis), est essentielle pour améliorer la précision des prédictions relatives à la dynamique des sprays, particulièrement dans les applications de sécurité incendie.

Effet de la coalescence des gouttes sur la prédiction du flux thermique en Dispersed Flow Film Boiling

Juan Esteban Luna Valencia^{1,*}, Tony Glantz¹, Michel Gradeck², Alexandre Labergue², Arthur Vieira Da Silva Oliveira³

* ✉ : juan-esteban.luna@asn.fr

¹ Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection

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

³ Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, Brazil

Mots clés :

Résumé :

Après un accident hypothétique de perte de réfrigérant dans le circuit primaire (LOCA) d'un réacteur nucléaire, les systèmes de sûreté injectent de l'eau afin de renouer le cœur du réacteur et limiter les conséquences de l'accident. En effet, même après l'arrêt du réacteur, les éléments fissiles du cœur continuent de dégager de la chaleur résiduelle, ce qui entraîne une hausse rapide de la température des crayons combustibles. Dans ces conditions, lors de la phase de rénoyage, l'eau entre alors en contact avec des crayons fortement chauffés, ce qui génère un flux de vapeur capable d'arracher des gouttes au niveau d'eau. Par conséquent, un écoulement diphasique composé de vapeur et de gouttes dispersées se forme en aval de ce niveau. D'autre part, selon la sévérité de l'accident, les crayons combustibles peuvent également se déformer par ballonnement, ce qui réduit partiellement la section hydraulique du cœur. Cette déformation, combinée à l'écoulement diphasique précédemment décrit, modifie significativement les conditions de refroidissement. Pour analyser de manière détaillée le refroidissement induit par cet écoulement en régime de Dispersed Flow Film Boiling (DFFB) ainsi que l'impact du blocage partiel de la section fluide, le banc expérimental COLIBRI a donc été développé. Ce dispositif permet non seulement de caractériser le refroidissement d'un tube vertical déformé soumis à un écoulement interne diphasique, mais également de mesurer le flux de vapeur et de gouttes à l'aide de techniques laser. Ces mesures expérimentales ont permis d'évaluer différents modèles et corrélations utilisés pour le calcul en DFFB à l'aide du code numérique mécaniste 1D NECTAR. Les comparaisons montrent que, pour les meilleures combinaisons de modèles (celles donnant les plus faibles écarts globaux entre expériences et calculs) l'erreur entre les flux de chaleur mesurés et simulés augmente lorsque le blocage de la section hydraulique est plus important. De manière générale, même avec la meilleure combinaison, le flux calculé tend à surestimer le flux expérimental, probablement parce que le code prend en compte la fragmentation des gouttes mais pas leur éventuelle coalescence. Pour cette raison, le modèle de Smoluchowski, complété par une approximation simple de la turbulence, a été intégré dans l'étude afin d'évaluer l'impact potentiel de la coalescence des gouttes sur les calculs thermiques de NECTAR dans la section partiellement bloquée de COLIBRI.

Etude du transfert de chaleur en régimes mouillants par ombroscopie et thermographie IR lors d'impacts de gouttes : effet de la mouillabilité de la surface

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

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

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

Mots clés : Refroidissement par spray ; Impact de goutte ; Thermographie par infrarouge ; Ébullition nucléée et de transition ; Mouillabilité.

Résumé :

Dans cette étude, les transferts thermiques lors de l'impact de gouttes d'eau sur des surfaces chauffées sont étudiés, dans une large gamme de températures et de mouillabilité à l'aide de la thermographie infrarouge. Les résultats montrent que la température de paroi et la mouillabilité jouent un rôle clé dans la dynamique d'impact, le type de régime observé et l'intensité des échanges thermiques. Le modèle de contact thermique reste applicable tant que la nucléation n'intervient pas dans les instants initiaux de l'impact. Lorsque la nucléation se produit, elle augmente la densité de flux maximale en ajoutant l'énergie de vaporisation. La transition entre les régimes break-up et rebound apparaît comme un indicateur de l'entrée dans un régime d'impact non mouillant.

Étude expérimentale et numérique de la fusion de l'alliage Zamak (Zn-4Al) utilisé comme matériau à changement de phase (MCP) dans une enceinte fermée en acier inoxydable

Judy Rosso^{1,*}, Simon Li², Rémi Sanson¹, Frédéric Topin³, Grégory Largiller¹

* ✉ : judy.rosso@cea.fr

¹ CEA Grenoble

² CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

³ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

Mots clés : MCP, stockage thermique, simulation numérique

Résumé :

ATRIUM est un réacteur à neutrons rapide refroidi au sodium (RNR-Na) conçu dans le cadre du développement des nouvelles générations de centrales nucléaires. L'une des technologies proposées dans ce concept, introduite pour satisfaire les exigences de sûreté, est la conception d'un système compact et passif d'évacuation de la puissance résiduelle (EPuR). Ce composant a pour rôle de stocker la chaleur excédentaire du cœur nucléaire lors d'un arrêt d'urgence, et ce pendant plusieurs jours, sans intervention externe ni alimentation électrique. Afin de garantir la compacité du système, une configuration modulaire a été retenue : le matériau à changement de phase (MCP) métallique choisi pour stocker la chaleur, le Zamak (Zn-4Al), est encapsulé dans de multiples boîtes quasi cubiques en acier inoxydable SS430 d'environ 65 cm de côté. En conditions de fonctionnement, chaque bloc de MCP enfermé dans une boîte en acier inoxydable subit une transition de phase solide-liquide mobilisant une chaleur latente importante pour assurer sa fonction de stockage thermique. Le comportement thermique global du système est influencé par la dynamique du processus de fusion, elle-même affectée par l'interaction entre les parois internes de la boîte SS430 et le Zamak fondu. Dans notre étude, ce mécanisme est d'abord observé in situ à l'échelle de laboratoire (quelques grammes). Le comportement non-mouillant est attribué à la présence d'une couche d'oxyde native à la surface de l'alliage Zn-Al. La persistance de cette couche protectrice et son rôle devront être pris en compte lors de la montée d'échelle du système. Le comportement thermique du système est ensuite étudié grâce à un dispositif expérimental nommé ZABOX, représentatif, à une échelle réduite, d'un module du système d'EPuR. Une boîte en acier inoxydable (15x15x8 cm) est remplie d'un lingot de Zamak de 95x40x20 mm sous atmosphère d'azote, puis une des faces est chauffée par conduction. L'installation est instrumentée avec des thermocouples placés à la surface ainsi que dans la boîte et à l'intérieur du lingot. Une caméra infrarouge est utilisée pour mesurer la distribution de température sur toutes les surfaces externes de la boîte ; Lors de la chauffe, le champ thermique et la fusion du MCP sont ainsi clairement observés. Les données thermiques enregistrées lors des expériences permettent de reconstruire de manière indirecte la position du Zamak fondu et servent à l'ajustement d'un modèle CFD (Computational Fluid Dynamic) intégrant les mécanismes de transfert thermique et le comportement du MCP.

Lors de la conception des nouveaux réacteurs, des dispositifs sont intégrés pour limiter la formation du corium et pour en assurer la gestion en cas d'accident grave.

Asma Djermoune^{1,*}, Michel Gradeck², Alexandre Lecoanet¹, Nathalie Seiler¹, Nicolas Rimbert²

* ✉ : asma.djermoune@univ-lorraine.fr

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

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

Mots clés :

Résumé :

Dans le cadre de la compréhension des mécanismes d'ablation d'un solide par l'impact d'un jet liquide à surface libre, cette étude présente une analyse expérimentale détaillée de l'effet de l'inclinaison d'une surface solide sur la dynamique d'ablation. Des expériences ont été réalisées sur le dispositif HAnSoLO en utilisant un jet d'eau impactant un bloc de glace transparente, pour deux vitesses de jet (5 et 10 m/s), trois températures (30, 50 et 70 degC) et cinq angles d'inclinaison (0deg à 45deg). Les observations mettent en évidence trois régimes d'ablation : le régime de film, un régime transitoire jusqu'ici peu documenté, et le régime de piscine (pool-effect). L'augmentation de l'angle d'inclinaison modifie fortement la manière dont la cavité se remplit : la transition vers le régime de piscine apparaît plus rapidement lorsque l'angle augmente, en raison de l'obstruction de la paroi amont qui limite l'évacuation du liquide. En revanche, le temps nécessaire pour atteindre un remplissage complet de la cavité croît avec l'inclinaison, la paroi aval abaissée facilitant le drainage par gravité et retardant l'établissement du régime de piscine. L'analyse des profondeurs ablatées montre que, malgré les effets géométriques marqués sur l'hydrodynamique, la vitesse d'ablation au point de stagnation reste pratiquement constante pour des inclinaisons supérieures ou égales à 20deg, quels que soient les régimes d'écoulement (film, transitoire ou piscine). En revanche, à 0deg et 10deg, une diminution de la vitesse est observée en régime de piscine. Ainsi, l'inclinaison n'influence pas la cinétique d'ablation au point de stagnation dans les régimes film et transitoire ; en régime de piscine, elle modifie la dynamique du phénomène par rapport aux configurations à 0deg et 10deg. Par ailleurs, les courbes de profondeur ablatée en amont et en aval du point de stagnation montrent que l'ablation est systématiquement plus rapide en amont qu'en aval.

Melting droplet on an inclined plane

Mehdi Stiti^{1,*}, Julien Sebilliau¹, Dominique Legendre¹, Sergiopedro Peraltaventocilla¹, Guillaume Castanet²

* ✉ : mehdi.stiti@outlook.fr

¹ Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, CNRS INPT UPS, Toulouse, France

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

Mots clés :

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude expérimentale du dégivrage d'une goutte initialement gelée et déposée sur une paroi inclinée. L'objectif principal est de comprendre comment l'angle d'inclinaison de la paroi et le volume initial de la goutte influencent la dynamique de fonte, le glissement de la goutte dégivrée, ainsi que l'épaisseur critique de glace qui permet la transition entre l'adhérence et le mouvement. Cette problématique présente un intérêt majeur pour plusieurs applications industrielles, notamment le dégivrage des surfaces aéronautiques, les systèmes de réfrigération, les échangeurs thermiques, ou encore les stratégies de gestion de l'humidité dans les environnements froids. L'étude combine imagerie haute résolution et mesures temporelles précises pour suivre l'évolution de la goutte au cours du processus de dégivrage. La configuration expérimentale permet de visualiser en continu le front de dégivrage, c'est-à-dire la frontière entre la phase solide et la phase liquide. Ces observations mettent en évidence des régimes distincts de fonte, influencés par la géométrie de la goutte, les flux de chaleur imposés, et la gravité. Les résultats montrent que l'angle de la paroi joue un rôle déterminant à la fois sur la morphologie de la phase fondue et sur la répartition de l'épaisseur résiduelle de glace. Plus l'inclinaison est forte, plus la goutte liquide se réorganise rapidement, ce qui modifie la localisation du front de dégivrage et l'équilibre des forces hydrodynamiques. Un paramètre clé mis en évidence est l'épaisseur minimale de glace à partir de laquelle le poids de la goutte liquéfiée surmonte l'adhérence solide, entraînant le glissement. Cette épaisseur critique dépend fortement du volume de la goutte : les volumes plus importants nécessitent un film solide plus mince pour initier le mouvement, en raison d'une force gravitaire accrue. Enfin, la dynamique de glissement de la goutte partiellement ou totalement fondue est caractérisée en termes de vitesse instantanée, d'accélération et de modification de forme. Ces paramètres fournissent des éléments essentiels pour modéliser la transition mouillage-adhérence-glissement et pour améliorer les stratégies de dégivrage actif ou passif. Ce travail apporte ainsi de nouveaux éléments de compréhension sur les mécanismes couplés de fonte, d'hydrodynamique et d'adhérence, et ouvre la voie à des approches de modélisation prédictives intégrant à la fois la thermodynamique du dégivrage et la mécanique du glissement des gouttes.

Caractérisation thermo-structurale de paraffines commerciales : comparaison entre formes vrac et microencapsulées

Lydia Ferdjallah^{1,*}, Christophe Cheng¹, Magali Fois, Laurent Ibos¹

* ✉ : lydia.ferdjallah@u-pec.fr

¹ Université Paris Est Créteil, CERTES, OSU Efluve

Mots clés : matériaux à changement de phase, analyse thermique, stockage thermique

Résumé :

Caractérisation thermo-structurale de paraffines commerciales : comparaison entre formes vrac et microencapsulées Lydia Ferdjallah^{1,*}, Christophe Cheng¹, Magali Fois¹, Laurent Ibos^{1,2}
 1 Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-94010 Créteil, France. 2 Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-77567 Lieusaint, France. Auteur correspondant : lydia.ferdjallah@u-pec.fr Les matériaux à changement de phase (PCM), en particulier les paraffines, sont largement étudiés pour le stockage d'énergie thermique, notamment dans le cadre de la réduction des îlots de chaleur urbains et de l'amélioration du confort thermique des bâtiments. Ces matériaux peuvent être utilisés à différentes échelles, aussi bien en extérieur (par exemple dans les infrastructures routières) qu'à l'échelle du bâtiment. Parmi les PCM disponibles, les paraffines commerciales couvrent une large gamme de températures de changement de phase. Pour les applications liées au bâtiment, les paraffines présentant une transition entre 28°C et 35°C sont particulièrement adaptées. Toutefois, des variations liées à la composition, au fournisseur ou encore à la nature du matériau utilisé pour l'encapsulation peuvent influencer significativement leurs propriétés thermiques et structurales. Dans la continuité de travaux antérieurs [1], cette étude vise à comparer plusieurs paraffines présentant une température de changement de phase d'environ 28°C, sous forme vrac et microencapsulée. Des analyses complémentaires ont également été réalisées sur d'autres paraffines (RT31 et RT35HC) afin de mieux comprendre leur comportement cristallin. Les propriétés thermiques ont été caractérisées par calorimétrie différentielle à balayage (DSC), tandis que la structure cristalline a été étudiée par diffraction des rayons X (DRX). Les résultats préliminaires mettent en évidence des différences notables d'enthalpie et de comportement de transition de phase entre des paraffines présentant pourtant des températures de fusion similaires. Les analyses DRX révèlent également des variations de cristallinité et d'organisation cristalline selon les matériaux et leur formulation. Par ailleurs, l'encapsulation semble modifier la structure cristalline, notamment en raison de la présence de la coque polymère. Ce travail souligne l'intérêt d'une approche combinant analyses thermiques et structurales pour la sélection des PCM. Les perspectives visent à étendre cette étude à d'autres matériaux ainsi que leur intégration dans des matériaux de construction pour des applications en extérieur et en intérieur. [1] Ferdjallah L, Fois M, Ibos L, Dumoulin J. Utilisation de matériaux à changement de phase pour lutter contre les îlots de chaleur urbains 2023. <https://doi.org/10.25855/SFT2023-079>.

Changement de phase : une cinétique assimilable à un essai de fluage ?

Alexis Iung^{1,*}, Jules Voguelin Simo Tala²

* ✉ : alexis.iung@icam.fr

¹ Icam site de Lille

² IMT Nord Europe, Institut Mines Télécom, Univ. Lille, Centre énergie & environnement, F-59000 Lille

Mots clés : changement de phase, approche mécanique, expansion volumique, travail expérimental

Résumé :

La baisse de l'utilisation de ressources fossiles au profit d'énergies renouvelables intermittentes implique le développement de systèmes de stockages d'énergie toujours plus performants. Grâce à leur grande capacité de stockage thermique, les matériaux à changement de phase (MCP) se sont imposés comme les plus sérieux candidats pour stocker efficacement et durablement l'énergie. Très avantageux thermiquement parlant, ils sont toutefois accompagnés d'une problématique mécanique majeure : une expansion volumique élevée, pouvant aller jusqu'à 15%. Cet article propose une approche expérimentale visant à quantifier cette expansion volumique et à explorer une analogie avec un essai de fluage. Le dispositif expérimental repose sur une cellule constituée de deux cylindres creux en PMMA. Le premier, chauffé par un bain d'eau thermostaté, joue le rôle de source thermique. Le second agit comme isolant pour limiter les pertes de chaleur. Une hauteur H de MCP liquide est confinée entre les deux cylindres et repose sur une lame d'eau. Les paraffines utilisées (gamme RT de Rubitherm) sont non miscibles à l'eau et présentent une densité inférieure, ce qui les positionne dans la partie supérieure de la cellule. L'ensemble est connecté à une colonne d'eau permettant de contrôler l'expansion volumique du MCP et de mesurer le volume d'eau déplacé. Deux configurations expérimentales ont été étudiées : Application de deux gradients thermiques distincts sur un même MCP (RT35) Application d'un gradient thermique identique sur deux MCP différents (RT35 et RT42) La variation du volume d'eau déplacé est enregistrée en fonction du temps pour chaque configuration. L'objectif de cette communication est de discuter la pertinence d'une analogie entre la solidification d'un MCP et un essai de fluage, en s'appuyant sur les cinétiques observées.

Comparative Study of Photovoltaic Cooling Techniques Under Identical Conditions

Mohammad Abou Akroush^{1,*}, Cathy Castelain¹

* ✉ : mhammadakrouch@gmail.com

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : Photovoltaic systems ; Cooling techniques ; Experimental platform ; Thermal management ; Phase change materials ; Air cooling ; Water cooling ; Evaporative cooling ; Renewable energy ; Performance comparison ; Data acquisition ; Arduino ; ESP32.

Résumé :

This work presents an ongoing experimental study for the comparative evaluation of photovoltaic (PV) cooling techniques under identical outdoor conditions in the Bekaa region, Lebanon. A unified experimental platform has been developed, where seven PV configurations, including air cooling, water spray cooling, phase change material (PCM) systems, finned heat sinks, ducted forced convection, and evaporative cooling, are applied to identical 30 W PV modules. A real-time data acquisition system based on Arduino Mega and ESP32 has been designed to monitor temperature, irradiance, voltage, current, and power output, with automatic data logging using PLX-DAQ. A temperature-based control strategy is implemented, where the cooling systems are activated when the PV surface temperature exceeds 40°C. At this stage, the system design, fabrication, and control integration have been completed, while the experimental testing and performance evaluation are still in progress. The final aim of this study is to provide a fair comparison between different PV cooling techniques and identify the most effective and practical solutions for real-world applications.

Étude de la stabilisation de l'ébullition convective par matrice de picots macroscopiques à l'aide de la thermométrie de luminophores bidimensionnelle

Sacha Hirsch^{1,*}, Nicolas Fdida¹, Cornelia Irimiea¹, Guillaume Pilla¹, Sylvain Petit¹, Benoît Fond²

* ✉ : sacha.hirsch@onera.fr

¹ ONERA/DMPE, Université de Toulouse, Toulouse, France

² ONERA/DAAA, Meudon, France

Mots clés : Changement de phase, thermique, échangeurs de chaleur, thermométrie de luminophores, métrologie, picots, thermométrie, diagnostics optiques

Résumé :

Les matrices de picots macroscopiques sont utilisées dans divers échangeurs monophasiques, notamment pour refroidir des aubes de turbine. Cette étude porte sur l'extension de leur emploi à des écoulements bouillants. En effet, le changement de phase du fluide caloporteur est un phénomène fortement endothermique, permettant de refroidir efficacement les surfaces chaudes d'un système donné. La thermométrie infrarouge n'est pas adaptée à une géométrie aussi complexe. C'est pourquoi la thermométrie de luminophores est développée de manière originale comme alternative adaptée au système étudié. Cette technique optique permet de mesurer directement des champs de température surfaciques d'une géométrie complexe au travers de l'écoulement bouillant instationnaire. Les résultats obtenus dans un canal refroidi par eau montrent que le rôle des picots dans l'intensification de l'échange de chaleur est distinct du cas monophasique. Dans le cas diphasique, l'amélioration du coefficient d'échange global, liée à la favorisation de l'évaporation en film liquide, est estimée à 25 %. D'une part, l'ébullition nucléée est limitée en faveur de l'évaporation d'un film liquide, plus efficace. D'autre part, la stabilité accrue du film permet de retarder la crise d'ébullition. Au total, le coefficient d'échange global maximum atteint pour la géométrie à picots est de 17.4 kW/(m²K), contre 12.6 kW/(m²K) en géométrie plane. Les champs de températures montrent la quasi-absence de départs de bulles en géométrie à picots. Des distributions de température de surchauffe sont obtenues et sont comparées entre géométries et régimes d'écoulement. Enfin, des gradients de température verticaux dans des picots sont mesurés dans différents régimes d'écoulement, du monophasique liquide à l'ébullition en film (vapeur). L'ensemble de ces résultats quantitatifs permet d'alimenter des modèles 0D ou 3D (CFD) d'échangeurs à changement de phase, à la fois pour des géométries planes et à matrices de picots.

Étude des transferts de chaleur et de masse lors de l'évaporation d'une goutte sur une paroi : influence des propriétés du substrat

Oumayma Somrani^{1,*}, Lounès Tadrist¹

* ✉ : oumaymasomrani@gmail.com

¹ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

Mots clés : Évaporation, goutte sessile, flux thermique, caractérisation expérimentale, propriétés du substrat.

Résumé :

L'évaporation d'une goutte sessile est gouvernée par les transferts de chaleur et de masse aux interfaces de la goutte avec son substrat et son environnement. Une caractérisation précise de ces transferts est donc cruciale pour interpréter les dynamiques d'évaporation. Cette étude présente une analyse des transferts de chaleur et de masse durant l'évaporation d'une goutte d'eau déposée sur des substrats aux propriétés thermiques contrastées. Une méthodologie originale, combinant des mesures simultanées par fluxmètre thermique, balance de précision et imagerie optique, permet de quantifier le débit d'évaporation et le flux de chaleur interfacial. Dans cette étude, nous présentons les résultats obtenus à partir d'expériences réalisées avec des gouttes d'eau pour différentes conditions opératoires. Ces résultats sont ensuite comparés et interprétés à des résultats numériques obtenus par ailleurs pour accéder à l'évolution des différents paramètres du système goutte-substrat tout au long du processus d'évaporation, depuis le dépôt jusqu'à disparition complète. Nos résultats démontrent une influence significative de la nature du substrat sur la dynamique d'évaporation. Sur un substrat isolant, le flux de chaleur mesuré reste faible (ABS). En revanche, sur un substrat conducteur (aluminium), ce flux augmente considérablement, traduisant un transfert de chaleur accru vers la goutte. Par ailleurs, nous mettons en évidence une réponse transitoire du fluxmètre différente selon le protocole de dépôt de la goutte. Ces résultats soulignent l'importance du contrôle des conditions initiales, du choix du support et du protocole expérimental.

Étude et Modélisation Numérique du refroidissement par immersion en application aux packs batteries Lithium-ion

Taissir Kasraoui^{1,2,*}, Rafik Benabid

* ✉ : taissir.kasraoui@ipsa.fr

¹ INRAE

² INSTITUT POLYTECHNIQUE DES SCIENCES AVANCEES

Mots clés : Thermique, Ébullition, Mini-canal, CFD Diphasique, Emballlement thermique, Flux critique.

Résumé :

Le transport représente le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre (GES) en France. Ce secteur est responsable de 31% des émissions directes de GES en France en 2019. D'un point de vue climat, trois solutions permettent de décarboner les utilitaires à hauteur des enjeux climatiques : le biogaz, les batteries électriques et l'hydrogène bas carbone. Dans cette démarche plusieurs constructeurs automobiles se sont lancés dans le domaine de l'électrique/hybride. Ces nouvelles technologies permettent une décarbonisation à la hauteur des enjeux climatiques (-85% en cycle de vie) ce qui permet d'apporter des bénéfices importants en milieu urbain. Concernant les packs de batteries lithium-ion, ces derniers présentent des contraintes comme leur autonomie limitée ainsi que des problèmes liés à la gestion thermique. En effet, le développement actuel des voitures électriques incite à utiliser des packs de batteries de plus en plus puissants et compacts ce qui amplifie le risque de l'emballement thermique qui se produit lorsqu'une cellule est endommagée ou défectueuse ou lorsqu'elle dépasse une certaine température. Dans ce cas, la cellule s'échauffe spontanément et sa température croît rapidement ce qui peut provoquer l'expulsion de gaz inflammables, une réaction en chaîne dans tout le pack et in fine un incendie ou une explosion. A cet issu, plusieurs techniques de refroidissement des batteries ont été développées. Nous citons le refroidissement par immersion dans un fluide diphasique isolant dans lequel baignent toutes les cellules du pack batterie. Si le principe n'est pas nouveau, l'originalité du dispositif repose essentiellement sur les propriétés du fluide utilisé. Ce dernier possède une température d'ébullition assez basse (35 à 65 deg C environ). Dès que la température dépasse ce seuil critique, le fluide se vaporise au niveau du point chaud, favorisant localement une forte absorption de chaleur et de ce fait, un refroidissement ciblé et efficace. Ce phénomène est passif, ce qui garantit en théorie un maintien de l'extraction de la chaleur, même en cas d'arrêt de la pompe qui fait circuler ce fluide. Cette technologie consiste à bien choisir le bon fluide diphasique qu'il soit efficace sur le plan énergétique et vert sur le plan environnemental. C'est dans ce contexte ainsi qu'intervient notre travail qui consiste à étudier numériquement l'écoulement diphasique d'un liquide qui doit changer de phase pour maintenir la température afin d'éviter l'emballement thermique, et évacuer la chaleur en situation accidentelle. L'agencement des cellules dans le pack et leur faible espacement induisent un problème scientifique d'ébullition convective en mini-canal vertical. L'ébullition convective en milieu confiné est un mode de transfert de chaleur très efficace pour dissiper les flux élevés. Une question qui se pose est de connaître l'efficacité d'un tel écoulement dans le cas hypothétique d'un emballement thermique.

High-Temperature Phase Change Dispersions (PCDs) as Advanced Heat Transfer Fluids ; Development and Characterisation

Tahmin Tajikghanbari^{1,*}, Ernesto Mura¹, David Chalet¹

* ✉ : tahmin.tajik-ghanbari@ec-nantes.fr

¹ Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LHEEA, UMR 6598, Nantes, France

Mots clés : Phase Change Dispersion (PCD) ; Phase Change Materials (PCM) ; Heat Transfer Fluids ; Surfactant ; HDPE ; Nano-materials ; Thermal Characterisation

Résumé :

In this research, the development and characterization of Phase Change Dispersions (PCDs) for use as a heat transfer fluid at high temperatures were investigated. The main goal of this work is to design and optimize a stable emulsion based on high-density polyethylene (HDPE) in water that can maintain stable and reproducible performance up to a temperature range of approximately 120 degrees Celsius. For structural stability, non-ionic heat-resistant surfactants such as Pluronic F-127 and Brij S20 have been used. Initially the effect of surfactant type and concentration on the phase stability and particle size of the dispersions will be investigated and then thermal characterization will be performed using differential scanning calorimetry (DSC) to determine the melting temperature, latent heat, and apparent specific heat capacity. Also, the effect of adding conductive nanoparticles on increasing thermal conductivity and improving heat transfer behavior will be evaluated with the aim of identifying the optimal PCD-nano composition as a heat transfer fluid with high heat capacity and long-term stability. These high-temperature PCDs are expected to provide greater thermal stability and temperature uniformity under varying operating conditions, in addition to increasing the fluid's heat capacity compared to water. Such fluids can be an effective substitute for conventional heat transfer fluids in energy storage systems, particularly in Carnot batteries and other high-temperature thermal systems.

Refroidissement de composant électronique par immersion avec injections de bulles d'air.

Mbaye Kane^{1,*}, Nicolas Baudin¹, Van Quan Hoang¹, Jean-Baptiste Bracq¹, Jérôme Bellettre¹

* ✉ : mbaye.kane@etu.univ-nantes.fr

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : Refroidissement électronique, Refroidissement par immersion, Dynamique des bulles, Écoulements diphasiques

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le contexte du refroidissement des équipements électroniques, où les CPUs et GPUs (processeurs et cartes graphiques) peuvent avoir des densités de puissances thermiques très élevées ($\sim 90 \text{ W/cm}^2$). Les solutions classiques, comme le refroidissement par air, deviennent limitées, tandis que les approches diphasiques, bien que performantes, restent complexes à maîtriser et posent des enjeux environnementaux. Une alternative étudiée ici est le refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique sans changement de phase, avec injection de bulles d'air. L'objectif est d'intensifier les transferts thermiques en exploitant l'agitation du fluide induite par les bulles, sans recourir au changement de phase. La littérature montre que la dynamique des bulles dépend fortement de leur taille, des propriétés du fluide et des interactions entre bulles, avec des trajectoires pouvant être rectilignes ou oscillantes. Des études ont également mis en évidence que l'injection de bulles peut améliorer les transferts thermiques, notamment lorsque leur fraction volumique augmente, ou lorsque leur distribution est non homogène. Toutefois, peu de travaux s'intéressent aux transferts thermiques dans des écoulements à bulles en géométrie confinée, en particulier au sein de radiateurs à ailettes, et les mécanismes restent encore très peu étudiés. Dans ce contexte, ce travail vise à mieux caractériser les écoulements diphasiques à bulles afin de préparer l'étude des transferts thermiques. L'approche adoptée consiste à se concentrer dans un premier temps sur l'hydrodynamique. Pour ce, un dispositif expérimental transparent a été développé pour observer la dynamique des bulles. Une première étape porte sur l'étude d'une bulle isolée dans un liquide (EC-110) au repos. Cette configuration permet de valider les modèles théoriques et numériques de type VOF mis en place. Par ailleurs, afin de mieux traiter le cas des trains de bulles, un algorithme de reconnaissance automatique basé sur le traitement d'images a également été mis en place. Il permet d'extraire des grandeurs clés comme la position, la taille et la vitesse des bulles. Les premiers résultats montrent une bonne cohérence entre approches expérimentale, numérique et analytique, notamment sur la vitesse de montée. Les perspectives concernent l'étude de configurations plus complexes, incluant les interactions entre bulles, les effets du confinement et, à terme, le couplage avec les transferts thermiques dans des géométries représentatives de systèmes de refroidissement.

Study of the Boiling Process in Electric Jet Boilers – Optimization of Equipment Durability Based on Experimental Data Analysis and Multiphysics CFD Process Modeling

Ahmed Seif^{1,2,*}, Michel Gradeck², Stéphane Dufour², Philippe Schatz¹, Jean-Pierre Fortunel¹

* ✉ : ahmed.seif@univ-lorraine.fr

¹ Stein Energy Boilers SAS, Cernay, France

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

Mots clés : Jet electrode boilers, Boiling process, Joule heating, Heat transfer, CFD simulation, Thermal optimization

Résumé :

Industrial systems are increasingly transitioning toward renewable energy in order to reduce carbon emissions and reliance on fossil fuels.[1] In this context, boilers remain major consumers of fossil fuels for heat generation, highlighting the need for efficient electrified alternatives.[2] Among these solutions, jet electrode boilers provide an efficient method for converting electrical energy into steam.[1] These boilers operate by discharging conductive water as high-velocity jets onto high-voltage electrodes to allow current to flow through the fluid and generate volumetric Joule heating. This mechanism leads to rapid steam production with high efficiency, making these systems well suited for grid balancing by using surplus electricity from intermittent renewable sources.[1] Despite their long-standing use, electrode jet boilers face durability and stability challenges under dynamic conditions.[1] Transient regimes during start-up and shutdown may lead to electric arc formation. This phenomenon results in localized high-intensity electric fields, accelerating electrode degradation.[1] Moreover, boiling may induce vapor priming and droplet entrainment, degrading steam purity.[3] Additional complexities arise from electrochemical reactions, resulting in the generation of hydrogen and oxygen gases.[1] The coupled interactions between fluid dynamics, heat transfer, phase change, and electromagnetic fields within the jet region remain poorly understood. This PhD project, conducted within a CIFRE collaboration between AIT Stein Energy Boilers and the LEMTA (Université de Lorraine), aims to develop a comprehensive multiphysics framework to investigate these phenomena by investigating the boiling process within jet electrode boilers through a combined numerical and experimental approach. A computational fluid dynamics model will be developed to capture the coupled interactions within the jet region supported by experimental validation. Parametric studies will be conducted to evaluate the effects of water conductivity, current frequency, and nozzle geometry on system stability and performance. The main objectives are to reduce electrode wear, prevent arcing, improve steam quality, and enhance operational flexibility under dynamic conditions. The expected outcomes include improved understanding of vapor formation and electric-field interactions, and the development of optimized design concepts to enhance the durability and reliability of jet electrode boilers. References [1] Zhao, Z., Hu, R., Zhang, Y., Dong, H., & Du, Q. (2025). Current Research Status and Prospects of Electrode Boilers Under the Background of the "Dual Carbon" Goals. *Energies*, 18(4), 769. [2] Rissman, J. (2022). Decarbonizing low-temperature industrial heat in the U.S. Energy Innovation Policy and Technology LLC. [3] He, X., Ruan, Y., & Wang, W. (2024). Three-Dimensional Transient Electric Field Characteristics of High-Pressure Electrode Boilers. *Electronics*, 13(9), 1615.

Thermal convection and melting dynamics in a Phase Change Material (PCM) embedded in a porous solid foam

Nicolo Sgreva^{1,*}, Sébastien Leclerc¹, Christel Metivier¹

* ✉ : nicolo.sgreva@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Phase change materials, Thermal convection, Porous media

Résumé :

Solid-liquid Phase Change Materials (PCMs) are key components in thermal energy storage thanks to their ability to store and release large amounts of energy through latent heat. They are often embedded in macroscopic porous structures to prevent leakage, enhance heat transfer, and improve solidification. The resulting composite systems exhibit thermal behaviors governed by the geometry and thermal properties of the porous matrix, the evolution of PCM thermophysical properties during phase change, and the dominant heat-transfer mechanisms. Despite their relevance, detailed studies of convection-driven melting in PCM-saturated porous media remain limited because measurements in opaque materials are difficult to perform without disturbing the system. To address this issue, we use Magnetic Resonance Imaging (MRI) to investigate a paraffin embedded in a highly porous foam disk whose thermal conductivity is comparable to that of the PCM. The system is subjected to constant heating at the bottom and cooling at the top, allowing stationary melt fronts to develop. Thanks to MRI's ability to track the melting interface within the bulk and measure fluid velocities, our experiments show that convection generates a wavy melting interface and significantly enhances melting, producing liquid heights more than twice those obtained under conduction. Flow-field measurements reveal convection patterns ranging from cross-rolls to hexagonal and square cells, with local velocities strongly influenced by the porous geometry. Heat-transfer analysis shows that a clear Nusselt-Rayleigh trend emerges when the data are rescaled to include both the temperature difference ratio between solid and liquid PCM and the relative thicknesses of these layers. This provides a basis for future studies of coupled convection and phase change in porous media, including systems with mushy layers or porous structures with different geometries and thermal-physical properties.

Vers la caractérisation des oscillations induites par changement de phase dans un tube capillaire

Romain Collignon^{1,*}, Frédéric Lefevre¹, Romuald Rulliere¹

* ✉ : romain.collignon@insa-lyon.fr

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

Mots clés : Caloduc oscillant, Transfert de chaleur, Changement de phase, Film liquide

Résumé :

Un caloduc oscillant est un système diphasique passif de transport de la chaleur constitué d'un tube sinueux rempli d'un fluide qui fonctionne hors équilibre grâce à des mécanismes thermo-hydrauliques complexes. Le gradient de température qui lui est imposé conduit à la naissance de bulles de Taylor au sein du liquide. Leurs variations de volume et de pression permettent la mise en place d'un écoulement oscillant. Le nombre de paramètres intervenant dans le comportement dynamique et interfacial des différentes bulles est grand et il est difficile d'en isoler leurs effets. Une configuration simplifiée est donc étudiée. Il s'agit d'un tube capillaire vertical chauffé en partie supérieure et refroidi en partie inférieure et rempli d'un fluide à l'équilibre liquide-vapeur. Cette configuration permet l'oscillation auto-entretenu d'un ménisque à l'interface liquide vapeur entre les sources chaude et froide. Ce mouvement induit le dépôt par cisaillement d'un film liquide sur la paroi. Des travaux antérieurs ont présenté un modèle réduit décrivant l'écoulement et les transferts associés. Il a notamment été montré que l'évaporation du fluide au niveau de la ligne triple joue un rôle prédominant sur la dynamique du système. Dans ce travail, un nouveau modèle numérique réduit a été développé afin de résoudre l'équation dynamique de la chaleur à travers la paroi et le film dans les zones d'évaporation et de condensation du fluide tout en tenant compte de la variation de l'épaisseur du film. Les résultats de ce modèle ont permis de mettre en évidence l'influence de la nature du fluide, de la paroi ainsi que des paramètres géométriques sur le comportement dynamique du système. Par la suite, il est envisagé de développer des métrologies capables de mesurer la température et l'épaisseur du film de paroi lors du déplacement du ménisque. Ces résultats expérimentaux permettront de valider les résultats du modèle pour différents fluides et différents matériaux de paroi.

Thème 9

Phénomènes de combustion et étude des flammes

Analyse de performances de combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine classique	98
Dégradation thermique d'un câble électrique multiconducteur sous atmosphères inerte	99
Simulation prédictive de la combustion du fer en atmosphère d'oxygène pur, de l'allumage à la propagation.	100
Infrared Multispectral Emissivity Assessment of Materials Within a Combustion Chamber . . .	101

Analyse de performances de combustion de syngaz à haute teneur en vapeur d'eau dans une micro turbine classique

Jérémy Bompas^{1,*}, Ward De Paepe¹

* ✉ : jeremy.bompas@umons.ac.be

¹ Université de Mons, Faculté Polytechnique, service de Thermique et Combustion

Mots clés :

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.

Dégradation thermique d'un câble électrique multiconducteur sous atmosphères inerte

Modibo Dembele^{1,*}, Damien Marquis¹, Lucas Terrei², Anthony Collin²

* ✉ : modibo.dembelle@lne.fr

¹ Laboratoire national de métrologie et d'essais

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

Mots clés : Câble électrique ; Cône calorimètre ; Atmosphère inerte ; Pyrolyse ; Flux thermique critique ; Chaleur de gazéification

Résumé :

Cette étude examine le comportement de câbles électriques multiconducteurs dans des conditions d'incendie confinées et appauvris en oxygène. L'utilisation d'une atmosphère inerte permet d'analyser le comportement de la pyrolyse du matériau en supprimant tout phénomène de flamme et d'oxydation. Les expériences ont été menées dans un cône calorimètre avec des flux thermiques incidents variant de 5 à 60 kW/m². Ce travail introduit la prise en compte de la distribution du rayonnement incident sur la surface cylindrique du câble. En définissant un flux thermique moyen spatial sur la surface cylindrique exposée, l'étude corrige le biais lié à l'hypothèse d'un échantillon plat et fournit une estimation plus réaliste de la densité de flux reçue par ces câbles multiconducteurs. Les résultats montrent que le taux de perte de masse moyen par unité de surface augmente quasi linéairement avec le flux et la masse résiduelle diminue avec le flux. La pyrolyse du câble débute pour un flux critique de 4,8 kW/m². Ces résultats fournissent des données quantitatives pour mieux comprendre le comportement thermique des câbles électriques multiconducteurs dans des environnements confinés et peuvent contribuer à l'amélioration des modèles de pyrolyse avant l'oxydation et l'inflammation.

Simulation prédictive de la combustion du fer en atmosphère d'oxygène pur, de l'allumage à la propagation.

Morgan Dal^{1,*}, Frédéric Coste, Samy Touzouirt, Martina Ridlova², Nicolas Gallienne, Bernard Labégorre

* ✉ : morgan.dal@ensam.eu

¹ Arts et Métiers, ENSAM, Paris, France

² Air Liquide

Mots clés : Simulation numérique, combustion des métaux, oxydation rapide, goutte tombante

Résumé :

Dans le cadre de la sécurité industrielle, la maîtrise du comportement énergétique des métaux en atmosphère enrichie en oxygène, est un point crucial qui est étudié depuis plusieurs décennies. Des secteurs très différents sont concernés, tels que la production d'oxygène, la propulsion spatiale ou le milieu hospitalier. La problématique majeure est qu'un métal, sous conditions riches en oxygène et subissant un léger apport énergétique, peut s'oxyder de manière très intense et entretenue, rompant le confinement d'une enceinte ou d'une conduite et présentant par conséquent un risque humain et matériel. Cette thématique a été traitée jusqu'à maintenant selon deux points de vue, l'allumage, i.e. le moment où l'énergie apportée par la réaction d'oxydation entraîne un échauffement local non négligeable, et la propagation, lorsque la réaction de combustion est auto-entretenu. Dans les deux cas, le système présente des niveaux énergétiques élevés et une dynamique rapide. Cette thématique a été majoritairement étudiée de manière expérimentale, notamment grâce à des installations dédiées de type ASTM G124-16 (combustion d'un barreau pendant), très utilisées dans le domaine mais manquant souvent de reproductibilité et restant limitées en termes d'apport à la compréhension. Pour cette raison, les travaux présentés ici proposent un développement numérique de ce test, basé sur un modèle thermo-hydrodynamique et complété par la description du transport des espèces chimiques, de l'apport énergétique dû à la réaction et par la gestion de la frontière métal-oxyde / gaz. L'objectif est de proposer un modèle suffisamment multiphysique pour être prédictif, notamment au regard de critères d'allumage et de propagation. Après avoir présenté le cadre physique de la simulation et discuté des hypothèses les plus fortes, des résultats de comparaison numérique / expérimental illustreront le caractère prédictif du modèle. Une étude thermique sur les seuils d'allumage et de propagation illustrera finalement l'intérêt d'un tel outil pour le dimensionnement.

Infrared Multispectral Emissivity Assessment of Materials Within a Combustion Chamber

Stéphane Boubanga Tombet^{1,*}, Rodrigue Beaini, Antoine Dumont

* ✉ : s.boubanga@exosens.com

¹ Exosens, France

Mots clés : infrarouge, émissivité, transfert radiatif, multispectral, combustion

Résumé :

The study of dynamic temperature fluctuations within closed cavities is pivotal in numerous industrial applications. Infrared (IR) thermography is a useful tool to monitor and analyze these high-temperature environments, providing a non-intrusive means to identify hotspots, thermal gradients, and potential issues that could compromise system efficiency or safety. The remote nature of those measurements is often necessary; however, this brings the intrinsic complexity of the temperature and emissivity properties of a surface being intertwined in such data. Assessing a reliable emissivity through IR thermography is theoretically possible but challenging, particularly at high temperatures. An enclosed cavity leads to an additional challenge of a geometry-dependent apparent increase in emissivity. In this work, we describe a novel approach for solving this problem in the context of measurements within a model aircraft engine combustion chamber. By using thermocouples and a multi-spectral camera, we experimentally validate our radiometric model for the cavity. We first show how to evaluate the amplification factor of a cavity using numerical tools, and we then use these results to apply corrections on the camera signals for in-band radiance (IBR) measurements. The calculations are compared across 3 different wavebands to ensure their validity, with a difference lower than 2%. Finally, we showcase the importance of assessing the in-situ emissivity of a surface, which can change drastically with a large temperature variation and in a harsh environment. Using a calibration point given by a carefully placed thermocouple, the 2D temperature mapping of the whole scene is evaluated and compared in two different wavebands, leading to temperatures within $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ across the wavebands when the combustion chamber is at 700°C . As a non-invasive and non-destructive technique, this approach can be used to monitor in real time the evolution of the temperature and emissivity over a large temperature range. (Le poster peut être en français si souhaité)

Thème 10

Technologies de stockage de l'énergie thermique

Caractérisation de matériaux de stockage à chaleur latente par la thermodynamique des processus irréversibles	104
Matériaux composites céramiques recyclés intégrant un MCP pour la récupération de chaleur fatale industrielle	105
Numerical simulation of concrete based modular solid thermal energy storage system	106
Revue des systèmes de stockage thermique d'énergie appliqués aux enceintes d'AEC	107
Simulation des performances énergétiques d'un stockage souterrain à faible profondeur pour valoriser l'énergie solaire	108
Stockage électrothermique en chaleur latente par matrice conductrice issue des copeaux métalliques recyclés : vers une approche circulaire de la décarbonation de l'industrie.	109
Étude expérimentale et numérique d'un module de stockage thermique réversible pour réseaux urbains de chaud et de froid	110
Étude paramétrique d'un stockage d'énergie thermique à thermocline en lit fixe : effets du rapport d'aspect H/D et du niveau d'isolation	111
Numerical modeling of an open sorption heat storage reactor with a moving bed	112

Caractérisation de matériaux de stockage à chaleur latente par la thermodynamique des processus irréversibles

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

* ✉ : olives@univ-perp.fr

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

Mots clés : stockage thermique, changement de phase solide/liquide, chaleur latente, conductivité, thermodynamique des processus irréversibles

Résumé :

Le stockage d'énergie devient un élément clé dans la chaîne énergétique en permettant la mise en phase de la production à la consommation. Le changement de phase solide/liquide peut être mis à profit pour pouvoir réaliser un stockage performant. Ces performances sont directement liées aux propriétés des matériaux tant en termes de stockage (chaleur latente, capacités thermiques des phases solide et liquide) et de transfert (conductivités thermiques). Il a été montré précédemment l'intérêt de la thermodynamique des processus irréversibles en vue de l'identification de ces propriétés, en particulier de l'effusivité et la conductivité. Désormais, il s'agit d'évaluer la production d'entropie à partir de la résolution de l'équation bilan de la chaleur et de l'entropie. La méthode expérimentale consiste en la mesure et le traitement des températures superficielles et des flux de chaleur sur un matériau soumis à une sollicitation dynamique. Ainsi, le banc expérimental est constitué d'un échantillon accolé à une paroi dont on peut faire varier la température et isolé par ailleurs. Un capteur planaire inséré entre la paroi et l'échantillon mesure à la fois le flux et la température. Il s'agit de déterminer la production d'entropie au cours de la phase de charge. On compare les résultats obtenus sur des matériaux à changement de phase à base de paraffine telle que RT28 (Rubitherm) et qui imprègne une matrice de graphite poreuse. Cette matrice de graphite procure au matériau à changement de phase une conductivité thermique nettement plus élevée permettant des puissances de charge et de décharge aussi plus fortes. Les expressions de la production d'entropie lors de la charge ont été établies pour différents types de conditions limites. La thermodynamique des processus irréversibles conduit à l'obtention de la production d'entropie qui peut permettre d'établir l'efficacité exergétique du stockage.

Matériaux composites céramiques recyclés intégrant un MCP pour la récupération de chaleur fatale industrielle

Sarah Levy^{1,*}, Benjamin Grégoire¹, Fernando Pedraza¹, Alexandre Godin¹, Marie-Sara Mazen², Fabrice Rossignol², José Luiz Lara Cruz³, Jean-Pierre Bédécarrats³, Marie Duquesne¹

* ✉ : sarah.levy@univ-lr.fr

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

² Université de Limoges, Institut de Recherche sur les CERamiques

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

Mots clés : stockage haute température, récupération de chaleur fatale, MCP, durabilité de composites

Résumé :

En France, l'industrie représentait environ 18,4 % de la consommation nationale d'énergie finale en 2023 avec une forte dépendance aux combustibles fossiles et à l'électricité pour la production de chaleur alors qu'à l'échelle de l'Union Européenne, plus de 50% de la demande totale des industries métallurgique, chimique et céramique nécessite une production de chaleur à plus de 500degC. L'objectif de ces travaux est de développer un composite céramique - matériaux à changement de phase (MCP) destiné au stockage thermique haute température (500-800 degC). Ces composites sont des structures architecturées poreuses, imprimées en 3D à partir de matières premières recyclées, élaborées (IRCER) imprégnées de MCP inorganiques ou métalliques (LaTEP et LaSIE). Un composite eutectique Al-Si (88-12 % massique, température de fusion de 577 degC) - mélange céramique (andalousite, fumée de silice, SiC, ciment d'aluminates de calcium fourni par IMERYS) a été retenu (50 % massique chacun). Des échantillons sous forme de pastilles ont été formés par pressage uniaxial (100 MPa) puis ont subi un traitement thermique à 600 degC (air) pour oxyder l'AlSi et consolider la matrice. Les matériaux ont été caractérisés par MEB, Raman (détection de alpha-Al₂O₃) et DSC (40-600 degC, air et Ar). La microstructure révèle une matrice poreuse et une cohésion limitée, liées à une hydratation insuffisante du ciment. Les particules d'AlSi sont encapsulées dans une coquille d'alpha-alumine, assurant le confinement du MCP. Les mesures DSC montrent une fusion à 576-582 degC et une chaleur latente de 218 J/g, stable sur plusieurs cycles et sans fuite. Ces résultats sont prometteurs. En effet, La structure entièrement solide et la compatibilité chimique Al₂O₃/matrice facilitent l'intégration future en impression 3D et l'ajout de MCP complémentaires tout en assurant une stabilité chimique et thermique des matériaux

Numerical simulation of concrete based modular solid thermal energy storage system

Sarad Basnet^{1,*}, Sylvain Serra²

* ✉ : sbasnet@univ-pau.fr

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

Mots clés : Stockage thermique solide, Discrétisation numérique, Simulation

Résumé :

Le stockage d'énergie thermique à haute température (TES) offre une voie prometteuse pour améliorer la flexibilité énergétique industrielle et soutenir la décarbonisation de la chaleur. En tant que tampon thermique, le TES permet de stocker et de fournir de la chaleur en fonction de la demande ou des variations du prix de l'électricité. Cette recherche, menée en collaboration avec le Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP) et le partenaire industriel TotalEnergies, se concentre sur la modélisation dynamique et l'optimisation opérationnelle d'un système TES EnergyNest® couplé à une chaudière électrique. L'étude examine deux cas d'utilisation distincts, chacun caractérisé par une demande de chaleur variable et des prix fluctuants sur le marché de l'électricité. Dans le cadre de ces travaux, un modèle dynamique bidimensionnel a été développé afin de saisir les phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse qui régissent le comportement thermique de l'unité de stockage. Le modèle intègre la topologie du système, les propriétés des matériaux et l'interaction entre le milieu de stockage solide en béton (HEATCRETE® vp1) et les différents fluides caloporteurs (Therminol® VP-1 dans cette étude). Un modèle simplifié de chaudière électrique est intégré pour simuler un fonctionnement combiné dans des conditions industrielles réalistes. Ce travail établit principalement le cadre numérique pour la modélisation et la simulation d'un système TES à base de béton à haute température comprenant un tube double en U de 5 m de long intégré dans un domaine solide cylindrique, avec plusieurs cylindres disposés en série et en parallèle avec diverses combinaisons topologiques. Le modèle est implémenté dans le cadre Pyomo basé sur Python, en utilisant des équations différentielles partielles (EDP) discrétisées pour le comportement thermique transitoire dans les phases fluide et solide. La discrétisation spatiale est effectuée dans les directions axiale (à la fois dans le solide et le fluide) et radiale (uniquement dans le solide) à l'aide de la méthode des différences finies, tandis que l'évolution temporelle peut être résolue par des méthodes de collocation ou par différences finies. Une série de schémas de discrétisation est testée, ainsi que la sensibilité sur le nombre de points axiaux, radiaux et temporels, afin de déterminer la taille du pas permettant d'atteindre un équilibre entre la précision de la solution et le coût de calcul, une étape cruciale vers l'optimisation au niveau du système. Il est ensuite prévu d'étendre le modèle à un modèle d'optimisation afin de déterminer la stratégie d'exploitation optimale sur un horizon annuel, en maximisant l'utilisation de l'énergie et les bénéfices liés à la variabilité des prix du réseau électrique.

Revue des systèmes de stockage thermique d'énergie appliqués aux enceintes d'AEC

Lysie Godfrin^{1,*}, Didier Haillot¹, Stephane Gibout²

* ✉ : lysie.godfrin.1@ens.etsmtl.ca

¹ École de technologie supérieure (ÉTS), Montréal, QC, Canada

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

Mots clés :

Résumé :

Le Canada, deuxième pays le plus vaste au Monde derrière la Russie, possède un climat polaire, particulièrement froid dans certaines régions, notamment le Nunavut et le Nunavik. L'agriculture est donc rendue ardue dans ces régions, renforçant l'insécurité alimentaire et augmentant les importations de denrées. Les enceintes d'agriculture en environnement contrôlé (AEC) - serre, en conteneur ou sur des murs végétaux - sont une piste de solution pour répondre à cet enjeu qui pourrait de plus réduire considérablement l'impact écologique de l'alimentation en favorisant les circuits courts. Cependant, dans les régions au climat arctique comme le nord canadien, les espaces d'AEC consomment une quantité importante d'énergie pour fonctionner (éclairage et chauffage), il est donc indispensable de réfléchir à des technologies augmentant leur efficacité énergétique. Parmi ces technologies, le stockage thermique de l'énergie (STE) se présente comme une solution prometteuse, et fait l'objet de cette revue. En effet, celle-ci listera les différents systèmes de STE appliqués au domaine des espaces d'AEC, allant des systèmes sensibles aux systèmes latents en passant par les systèmes thermochimiques, qu'ils soient installés en Chine, au Canada ou au Maroc. Un tableau de synthèse rassemblant l'ensemble des technologies STE ainsi que des données clés les caractérisant tels que l'énergie, la puissance disponible, ou encore le rendement de ces systèmes clôturera la revue.

Simulation des performances énergétiques d'un stockage souterrain à faible profondeur pour valoriser l'énergie solaire

Diane Le Roux^{1,*}, Thibaut Colinart, Adrien Fuentes, Hervé Noël, Anthony Magueresse

* ✉ : diane.le-roux@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

Mots clés : Stockage thermique saisonnier, échangeur de chaleur souterrain horizontal, analyse de sensibilité, modélisation numérique dynamique, capteurs thermiques

Résumé :

La transition vers des systèmes énergétiques décarbonés exige des solutions innovantes pour gérer l'intermittence des énergies renouvelables, notamment du solaire thermique basse température. Dans cette étude, on s'intéresse à un système de stockage saisonnier à faible profondeur, utilisant des matériaux naturels (eau, sable) et un échangeur de chaleur horizontal enterré. L'objectif est de capitaliser sur l'excédent de chaleur produit entre mai et septembre pour préchauffer un fluide caloporteur en période froide. Pour évaluer la faisabilité, la robustesse et l'efficacité de ce stockage thermique souterrain, un modèle numérique dynamique a été développé sur le logiciel TRNSYS. Une analyse de sensibilité approfondie a ensuite été réalisée à l'aide de la bibliothèque SaLib sur Python, pour évaluer l'influence de paramètres critiques, en appliquant les méthodes Morris (pour le criblage des paramètres) et Sobol (pour l'analyse quantitative des variances). Ces analyses ont été réalisées sur un critère énergétique : l'énergie stockée et restituée par le système, évaluée selon trois scénarios distincts : Charge unique sur 3 mois avec des données météo fixées ; Charge et décharge quotidiennes sur 6 mois avec des données météo fixées ; Charge sur 6 mois (de juin à novembre) avec des données météo réelles et des données terrain issues de capteurs thermiques. Plusieurs campagnes d'analyse ont permis de dégager des résultats majeurs : - Paramètres opératoires : Les températures d'entrée lors des phases de charge et de décharge ont un impact limité sur les performances du stockage, contrairement à l'isolation et l'épaisseur du sol au-dessus du stockage, qui s'avèrent déterminants. - Isolation : L'épaisseur de l'isolant doit être de quelques centimètres, indépendamment de sa nature. - Géométrie de l'échangeur : L'augmentation du nombre de tubes par niveau de sable améliore significativement le stockage thermique. Cependant, un compromis doit être trouvé entre le nombre de tubes et leur espacement pour éviter les interférences et maximiser les transferts thermiques. Ces résultats alimentent une approche d'optimisation multi-objectifs, visant à concilier performance énergétique, viabilité économique et durabilité environnementale. Cette méthodologie vise à dimensionner le système de manière optimale, en intégrant des contraintes techniques et opérationnelles.

Stockage électrothermique en chaleur latente par matrice conductrice issue des copeaux métalliques recyclés : vers une approche circulaire de la décarbonation de l'industrie.

Merveil Iragi^{1,2,3,4,*}, Jérôme Soto, Elissa El Rassy, Xavier Py⁴, Frédéric Lontsi, Jérôme Soto^{3,4}

* ✉ : merveil.iragi@univ-nantes.fr

¹ Faculté d'ingénierie ULC-Icam

² Institu UCAC-Icam

³ Icam, site de Nantes, Carquefou, France

⁴ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : stockage thermique latent, copeaux métalliques recyclés, conversion électrothermique, effet joule, Power-to-Heat

Résumé :

1.Objectifs La décarbonation des procédés industriels impose le développement de solutions de stockage thermique efficaces et circulaires, capables de coupler conversion électrique et stockage de chaleur. Cette étude explore une voie de valorisation énergétique et matérielle à travers un système de stockage à chaleur latente intégrant une matrice conductrice issue de copeaux métalliques recyclés. L'objectif est de démontrer la faisabilité d'un chargement électrothermique in-situ par effet Joule et d'en évaluer la stabilité thermique, en vue d'applications industrielles de type Power-to-Heat. 2.Méthodes Un composite a été élaboré en incorporant des fragments d'acier inoxydable issus des rebuts des procédés métallurgiques dans une paraffine liquide RT70HC. La matrice métallique améliore à la fois la conductivité thermique et électrique, permettant une conversion électrothermique directe et accélérant le transfert de chaleur lors des cycles de fusion et de solidification. Les cycles de charge ont été réalisés sous une alimentation en courant continu (20V - 20A) avec suivi des températures par thermocouples type K. Les propriétés thermophysiques et la stabilité du composite ont été caractérisées par DSC et ATG. 3.Résultats Les essais expérimentaux ont mis en évidence une fusion homogène du matériau lors du chargement électrothermique, quatre fois plus rapide que le chauffage par fluide caloporteur (0,5 h contre 2 h). La matrice métallique assure une distribution quasi uniforme du flux de chaleur et une meilleure conductivité effective, améliorant la phase de décharge d'environ 50 %. Après 25 cycles avec une montée en température à 160 degC pour le dernier cycle, aucune dégradation chimique ou séparation de phase n'a été observée. Ces résultats valident la robustesse du couplage électrothermique et l'intérêt du recyclage métallique pour des systèmes de stockage à faible émission de carbone. Conclusion. Cette approche de stockage électrothermique à matrice recyclée combine efficacité énergétique, sobriété matérielle et valorisation directe de l'électricité en chaleur. Elle ouvre la voie à des modules Power-to-Heat intégrés, simplifiant la conversion et le stockage thermique pour la décarbonation des procédés industriels.

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

Thomas Terrien^{1,2,*}, Awa Sy, Arnaud Bruch, Fabrice Bentivoglio, Benoit Stutz³

* ✉ : thomas.terrien@cea.fr

¹ CEA Grenoble

² CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

³ LabOratoire proCédés énergie bâtimEnt (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB), CNRS UMR5271

Mots clés : Stockage thermique, Energie latente et sensible, MCP, thermocline, Convection naturelle, Conduction thermique

Résumé :

Ce travail présente une solution innovante de stockage thermique réversible, adaptée aux besoins des réseaux urbains. Grâce au couplage synergique entre stockage sensible (thermocline) et stockage latent (prise en glace), le système combine polyvalence saisonnière, compacité et simplicité d'intégration aux réseaux urbains. Les premiers essais mettent en lumière l'influence des phénomènes conducto-convectifs complexes, qui orientent désormais les développements numériques et expérimentaux futurs. Le dispositif expérimental VERSATILE se compose d'une calandre de 430 litres d'eau, et de deux circuits hydrauliques, intégrés dans la boucle thermique POLYTES, permettant simultanément l'apport de puissance chaude et froide. Il est instrumenté par 228 thermocouples pour connaître en temps réel la distribution de température à l'intérieur du réservoir et des circuits qui le traversent. En mode hiver, on stocke de la chaleur sensible sous forme d'eau chaude afin d'alimenter un réseau de chauffage hydraulique. En mode été, on stocke du froid latent sous forme de glace d'eau pour le redistribuer dans un réseau de climatisation. Le premier circuit permet la mise en place d'une thermocline verticale par injection d'eau chaude jusqu'à 90 degC, assurant la stratification thermique durant le mode hiver. Le second, alimenté par un groupe froid, fait circuler de l'eau glycolée à température négative (jusqu'à -20 degC), permettant la formation de glace autour des ailettes d'un échangeur spiralé en cuivre. Ce dernier favorise la solidification de l'eau utilisée comme MCP, exploitant ainsi son énergie latente de fusion au cours de la transition liquide-solide à 0degC. Une particularité de ce module est l'interaction étroite entre les deux technologies de stockage thermique : la thermocline se forme également lors de la décharge du système en mode été, et la fusion de la glace par contact direct avec le fluide caloporteur constitue un phénomène encore peu documenté expérimentalement.

Étude paramétrique d'un stockage d'énergie thermique à thermocline en lit fixe : effets du rapport d'aspect H/D et du niveau d'isolation

Manal Aatik^{1,2,3,4,*}, Jérôme Soto^{2,4}, Yilin Fan⁴, Damien Lecointe^{1,3}

* ✉ : manal.aatik@univ-nantes.fr

¹ IRT Jules Verne

² Icam, site de Nantes, Carquefou, France

³ Nantes Université, Nantes, France

⁴ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : Stockage thermique, stockage à thermocline, rapport d'aspect, chaleur fatale, procédés composites, efficacité énergétique, décarbonation industrielle, simulation numérique.

Résumé :

La valorisation de la chaleur fatale issue de procédés composites fonctionnant en cycles thermiques permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de contribuer à la décarbonation de l'industrie. Lors des phases de refroidissement, ces procédés génèrent des quantités de chaleur valorisables à moyennes et hautes températures, dont la récupération et le stockage peuvent réduire la consommation d'énergie et l'empreinte carbone. Le stockage à thermocline en lit fixe constitue une solution adaptée. Toutefois, ses performances restent sensibles aux paramètres géométriques et thermiques du réservoir, tels que le rapport d'aspect AR et le niveau d'isolation latérale, souvent contraints par les exigences d'intégration industrielle. Ce travail présente une étude paramétrique numérique évaluant l'effet de ces paramètres sur les performances énergétiques, la qualité de la stratification et les pertes thermiques. Les résultats indiquent qu'un réservoir plus élancé améliore la stratification et augmente la capacité stockée ainsi que l'énergie utile restituée, tandis que l'isolation améliore surtout le rendement énergétique, avec un effort de pompage plus élevé lorsque le rapport d'aspect augmente.

Numerical modeling of an open sorption heat storage reactor with a moving bed

Abdul-Gafar Adegoke Yunus^{1,*}, Nolwenn Le Pierrès¹, Florine Giraud¹

* ✉ : abdul-gafar-adegoke.yunus@univ-smb.fr

¹ LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB), CNRS UMR5271

Mots clés : Sorption heat storage system, open and moving bed reactor, heat and mass transfer model, sorption kinetics

Résumé :

Grâce à sa densité énergétique élevée, sa longue durée de stockage et ses faibles pertes thermiques, le stockage de chaleur par sorption intégré aux réseaux de chaleur constitue une solution prometteuse pour une gestion durable de l'énergie, en particulier pendant les périodes d'inadéquation entre l'offre et la demande. Cependant, les configurations de réacteurs thermochimiques à lit fixe souffrent souvent de limitations en matière de transfert de masse qui entravent leur réactivité et leur développement industriel. Pour relever ces défis, cette étude examine un système ouvert de stockage de chaleur par sorption avec une configuration à lit circulant, qui offre une meilleure flexibilité opérationnelle et un flux continu de matière. Dans la configuration ouverte, le système de stockage par sorption fonctionne à pression atmosphérique. La conception à lit circulant permet au matériau réactif d'entrer dans le réacteur par le haut, et de s'écouler par gravité, tandis que l'air humide circule à courant-croisé à travers le lit permettant la sorption de la vapeur d'eau. Après réaction, le matériau est évacué par le fond du réacteur et acheminé vers un réservoir de stockage séparé via un système de transport mécanique. Une modélisation précise de cette configuration est essentielle pour prédire les performances du système dans des conditions de fonctionnement variables et pour guider l'optimisation de la conception. Un modèle numérique détaillé basé sur la méthode des volumes finis dans MATLAB simule la phase de décharge, pendant laquelle la chaleur est libérée par la sorption de la vapeur d'eau. Le modèle capture le flux continu de matière réactive et tient compte du transfert couplé de chaleur et de masse ainsi que de la cinétique de sorption. Les résultats de la simulation mettent en évidence l'influence de la vitesse du lit, du débit d'air humide et des propriétés des matériaux sur la distribution de la température, la production d'énergie thermique et la durée de décharge.

Thème 11

Thermique de l'habitat et adaptation au changement climatique

Caractérisation et modélisation du comportement thermique de panneaux biosourcés dérivés de résidus bois guyanais	114
Développement d'un modèle de Monte Carlo symbolique appliqué aux transferts thermiques dans les bâtiments	115
Prédiction des paramètres de modèles RC de bâtiments par réseaux de neurones à partir de caractéristiques simples du bâtiment.	116
Bâtiments de bureaux en climat sahélien : calibration énergétique et hiérarchisation des leviers passifs et actifs de décarbonation	117
Bio-Based Building Envelopes with Phase Change Materials : A Thermal Lever for Carbon Neutrality in Mediterranean Buildings	118
Évaluation des apports thermiques d'un bardage métallique perforé sur bâtiment résidentiel : approche numérique par méthodes de Monte-Carlo et validation expérimentale	119
Modélisation de la convection externe autour des structures éphémères - Construction d'un modèle compact pour la convection naturelle et la convection forcée	120
Modélisation Hygrothermique Multi-échelle	121
Towards High-Efficiency Greenhouse Design : Impacts of Argon-Filled Double Glazing on Climate Uniformity and Energy Consumption	122

Caractérisation et modélisation du comportement thermique de panneaux biosourcés dérivés de résidus bois guyanais

Amal Haraketi^{1,*}, Ryad Bouzoudja¹, Tingting Vogt Wu¹, Pierre Vignon¹, Jean-Luc Coureau¹, Arnaud Day², Julie Bossu

* ✉ : amalhkt99@gmail.com

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

² Fibres Recherche Développement - COstruction Durable et EcoMatériaux

Mots clés : WUFI 2D, climat tropical, matériaux biosourcés, modélisation, transfert de chaleur et de masse

Résumé :

Dans une démarche de transition écologique et dans la quête des alternatives durables dans le domaine du bâtiment, l'adaptation des solutions de l'isolation thermique aux conditions climatiques est un défi central. En Guyane française, le climat tropical exige des contraintes particulières : ce territoire oscille entre une saison des pluies marquée par des précipitations fréquentes, taux d'humidité élevée, et une saison sèche caractérisée par de températures élevées et une humidité persistante. Parmi les stratégies adoptées par les acteurs du secteur du bâtiment est l'utilisation des matériaux biosourcés qui viennent compléter voire même remplacer les isolants traditionnels. Leur caractère renouvelable, leur faible empreinte Carbone ainsi que leurs performances hygrothermiques en font des alternatives intéressantes. Dans ce contexte s'inscrit notre étude où a émergé l'idée d'exploiter les déchets de fibres de bois tropicaux, largement disponibles et souvent négligés, comme un isolant thermique des toitures - surface la plus exposée aux apports solaires. Dans ce travail, une première étape consiste à caractériser les propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique) de panneaux fabriqués à partir de fibres de bois tropicaux, étudiés soumis à plusieurs conditions hygrométriques : sèche, ambiante et saturée. Cette étape a pour objectif d'évaluer l'influence du taux d'humidité sur les performances thermiques du matériau, et ainsi mieux comprendre les comportements thermiques des panneaux en fonction des conditions climatiques typiques de la Guyane. La seconde étape se focalise sur l'étude numérique à l'aide du logiciel WUFI 2D pour simuler le comportement hygrothermique d'une toiture intégrant ces panneaux isolants. Cette simulation nous permet d'évaluer l'influence des propriétés des panneaux sur la performance globale de la toiture en termes d'inertie dans des conditions réelles.

Développement d'un modèle de Monte Carlo symbolique appliqué aux transferts thermiques dans les bâtiments

Muhammad Yousaf Malik^{1,*}, Olivier Farges¹, Mouna El Hafi², Fadi Lahlou³, Benjamin Riou³

* ✉ : muhammad-yousaf.malik@univ-lorraine.fr

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

² RAPSODEE, UMR CNRS 5302, IMT Mines Albi, Campus Jarlard, 81013 Albi, France

³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Champs-sur-Marne, France

Mots clés : Monte Carlo Symbolique, Méthodes inverses, performance thermique des bâtiments, diagnostic thermique, transferts thermiques, estimation paramétrique

Résumé :

Les bâtiments représentent près de 30% de la consommation énergétique mondiale et des émissions de gaz à effet de serre, rendant indispensable une évaluation fiable de leurs performances thermiques dans le cadre des stratégies de transition énergétique. Parmi les outils de diagnostic, la thermographie infrarouge (IR) est largement utilisée en raison de son caractère non intrusif et de sa capacité à visualiser les distributions de température de surface. Toutefois, l'interprétation des données thermographiques demeure limitée, les approches classiques négligeant souvent les effets transitoires ainsi que le couplage entre conduction, convection et rayonnement dans des géométries complexes. Cette recherche, menée dans le cadre du projet MCMET, introduit un cadre de calcul basé sur la méthode Monte Carlo Symbolique (SMC) afin d'établir un lien rigoureux entre les observations thermographiques et l'analyse quantitative de la performance thermique des bâtiments. Grâce à SMC, des fonctions de transfert peuvent être dérivées des calculs de Monte Carlo en fonction des paramètres physiques tels que la conductivité thermique, les coefficients de convection et l'émissivité. Le bilan d'énergie est reformulé en termes probabilistes, les grandeurs d'intérêt étant exprimées comme des espérances de variables aléatoires définies sur l'espace des trajectoires. Dans ce cadre, la conduction et la convection sont traitées comme des processus linéaires, tandis que le rayonnement est linéarisé autour d'une température de référence en raison des faibles écarts de température typiques des applications du bâtiment. Pour illustrer cette approche, ce travail se concentre sur le cas unidimensionnel (1D), pour lequel une fonction de transfert symbolique de la température a été dérivée en fonction de la conductivité thermique. Cette formulation permet un calcul direct des champs de température transitoires une fois la conductivité estimée. L'orthogonalité entre les données décrivant la géométrie et l'algorithme Monte Carlo permet une extension naturelle du modèle du 1D au 3D à partir d'une modélisation CAO de la configuration. La méthodologie sera validée à l'aide de données expérimentales du CSTB, où les images IR mesurées seront comparées aux images synthétiques générées par Monte Carlo afin d'assurer un diagnostic thermique précis et une évaluation fidèle des performances. Le cadre sera ensuite appliqué à un problème inverse visant à estimer la conductivité thermique d'une paroi opaque en minimisant l'écart entre les températures de surface mesurées et celles simulées par SMC. L'orthogonalité entre les données géométriques et l'algorithme Monte Carlo permet une montée en dimension simple, du 1D au 3D, grâce à la description CAO de la configuration. Ce travail établit la méthode SMC comme un outil rapide, précis et évolutif pour le diagnostic thermique quantitatif, permettant une évaluation paramétrique robuste des performances thermiques des bâtiments.

Prédiction des paramètres de modèles RC de bâtiments par réseaux de neurones à partir de caractéristiques simples du bâtiment.

Antoine Dumont^{1,*}, Véronique Feldheim¹, Paul Lybaert¹

* ✉ : antoine.dumont@umons.ac.be

¹ Université de Mons, Faculté Polytechnique, service de Thermique et Combustion

Mots clés : modèles RC, bâtiments, approche boîte grise, réseau de neurones, énergie

Résumé :

En 2025, le secteur résidentiel demeure un levier essentiel de la transition énergétique, représentant près d'un quart de la consommation finale d'énergie dans l'Union européenne. La compréhension fine du comportement thermique des bâtiments reste donc un enjeu majeur pour optimiser les consommations en chaud et en froid. Les approches basées sur des modèles de type « boîte grise », construits à partir de schémas résistances-capacités (RC), offrent un compromis pertinent entre complexité physique et rapidité de calcul [1]. Jusqu'à présent, les paramètres RC étaient déterminés à partir d'une identification de système sur Matlab via des simulations détaillées sous TRNSYS. Dans ce travail, une approche alternative reposant sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels est proposée pour estimer directement les paramètres RC à partir des caractéristiques géométriques des bâtiments. Une base de données composée de 640 configurations géométriques variées (surface au sol, surface vitrée, orientation, rapports d'aspect) a été constituée. Les valeurs de référence des paramètres RC, obtenues par identification à partir de simulations TRNSYS, ont servi à l'entraînement et à la validation du réseau de neurones. La détermination de nouveaux paramètres RC par apprentissage automatique permet de constituer et d'enrichir une base de données étendue. Au-delà de la simple prédiction, cette approche permettrait de déterminer des relations entre les différents paramètres. Ainsi, à partir de quelques informations générales sur un nouveau bâtiment (telles que l'année de construction ou la typologie), ces relations peuvent être exploitées pour reconstituer un jeu de paramètres RC représentatif du bâtiment considéré et physiquement consistant, sans recourir à de nouvelles simulations TRNSYS ni à des procédures d'identification de système. Le modèle RC ainsi obtenu peut ensuite être directement simulé pour l'évaluation des besoins énergétiques du bâtiment. À terme, cette méthodologie favorise la génération automatisée de modèles thermiques simplifiés, utilisables pour l'évaluation énergétique à grande échelle (bâtiment, quartier ou ville). [1] A. Dumont, V. Feldheim et P. Lybaert. "Développement de modèles basés sur des schémas RC comme outil de cartographie pour les besoins en chaud à l'échelle du bâtiment." Papier présenté au Congrès Français de Thermique, Chambéry, France, 03 June 2025. doi :10.25855/SFT2025-111

Bâtiments de bureaux en climat sahélien : calibration énergétique et hiérarchisation des leviers passifs et actifs de décarbonation

Bazam Amonet Ouoba^{1,*}, Monica Siroux¹

* ✉ : bazam.ouoba@etu.unistra.fr

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

Mots clés : Modélisation énergétique, bâtiment de bureaux, climat chaud et sec, diagnostic énergétique, décarbonation

Résumé :

Dans les climats chauds et secs, les bâtiments sont généralement confrontés à de fortes sollicitations thermiques en raison des températures extérieures élevées et d'apports solaires importants. En plus de cela, l'inadaptation fréquente des matériaux de construction ainsi que les méthodes de construction conduit à des inconforts thermiques dans le bâtiment. Les bâtiments de bureaux se distinguent en outre par un recours important à la climatisation, entraînant une forte consommation d'énergie. Au Burkina Faso, peu d'études se sont intéressées à ces types de bâtiments, alors même qu'entre 2010 et 2023, la consommation énergétique des bâtiments de bureaux et de commerce a été multipliée par 7,7. Dans ce contexte, la modélisation énergétique constitue un outil pertinent d'aide à la décision pour identifier les leviers les plus efficaces de réduction des consommations énergétiques et des pointes électriques associés au refroidissement. L'objectif de cette étude est de faire une modélisation énergétique d'un bâtiment réel à quatre étages, situé dans la ville de Ouagadougou. Dans un premier temps, un audit énergétique a permis de collecter les données de consommation électrique, les habitudes d'usage des occupants ainsi que les factures d'électricité. Ensuite, le modèle a été élaboré sous DesignBuilder/EnergyPlus à partir de la géométrie du bâtiment, de son enveloppe, des profils d'occupation, des charges internes et des scénarios d'exploitation de la climatisation. Enfin, la calibration du modèle a été réalisée à l'échelle mensuelle par comparaison entre valeurs simulées et valeurs mesurées, à l'aide des indicateurs CV(RMSE) et NMBE. Les résultats montrent que l'indice de performance énergétique du bâtiment atteint 285,88 kWh/m².an, que la climatisation représente plus de 50 % de la consommation électrique totale et que le vitrage constitue la principale source d'apports thermiques. Ces résultats fournissent une base d'analyse pour le diagnostic énergétique et la réhabilitation des bâtiments tertiaires en contexte sahélien, tout en mettant en évidence des leviers concrets de réduction de la consommation énergétique et de la décarbonation.

Bio-Based Building Envelopes with Phase Change Materials : A Thermal Lever for Carbon Neutrality in Mediterranean Buildings

Salma Kouzzi^{1,*}

* ✉ : salma.kouzzi@etu.uae.ac.ma

¹ University of Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Morocco

Mots clés : Bio-based materials, Phase change materials, Building envelope, Hygrothermal performance, Mediterranean climate, Carbon neutrality, Thermal energy efficiency

Résumé :

The decarbonation of the building sector is a major challenge in the context of the 2050 carbon neutrality target, particularly in Mediterranean regions where cooling energy demand is steadily increasing. In this context, the optimization of building envelopes through passive thermal strategies represents a key lever for reducing operational energy consumption and associated greenhouse gas emissions. This study investigates the thermal, hygrothermal, and environmental performance of bio-based building envelope solutions incorporating phase change materials (PCMs). Several wall configurations are analyzed, including conventional reference walls and alternative assemblies based on plant-based insulation materials, such as hemp wool and wood fiber, with and without PCM integration. Dynamic hygrothermal simulations are carried out using WUFI Pro to assess heat and moisture transfer under representative Mediterranean climatic conditions. The results highlight the significant contribution of bio-based materials combined with PCMs to the improvement of indoor thermal comfort, the reduction of heating and cooling loads, and the mitigation of peak temperatures. Furthermore, the integration of PCMs enhances the thermal inertia of lightweight bio-based walls, leading to a better alignment between energy demand and climatic conditions. From an environmental perspective, these solutions show a strong potential for reducing the carbon footprint of building envelopes, supported by biogenic carbon storage and lower embodied energy. Overall, this work demonstrates that bio-based envelopes integrating phase change materials constitute an effective thermal lever to support the transition toward low-carbon and climate-resilient buildings in Mediterranean regions.

Évaluation des apports thermiques d'un bardage métallique perforé sur bâtiment résidentiel : approche numérique par méthodes de Monte-Carlo et validation expérimentale

Amandine Pinheiro^{1,*}, Julien Bouard², Fabrice Cousteur², Olivier Farges¹, Stéphane Lefort²

* ✉ : amandine.pinheiro@univ-lorraine.fr

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

² Gantois Industries, Saint-Dié-des-Vosges, F-88100, France

Mots clés : Protection solaire de façade, Simulation Monte-Carlo, Thermique de l'habitat

Résumé :

Cette étude vise à quantifier l'impact thermique de bardages métalliques perforés installés en façade de bâtiments résidentiels. Ces produits, fabriqués par Gantois Industries, présentent une grande variabilité : motifs de perforation, pourcentage de vide, couleur, espacement au mur, inclinaison. L'objectif est d'identifier les configurations optimales pour maximiser les bénéfices thermiques, notamment la réduction des apports solaires estivaux. Un modèle complet a été développé avec les logiciels STARCAD et STARDIS, basés sur les méthodes de Monte-Carlo. Cette approche permet de traiter des géométries complexes sans pénalité sur le temps de calcul, de coupler naturellement conduction, convection et rayonnement, et d'intégrer des données météorologiques réelles. Des codes paramétriques génèrent automatiquement les géométries de différents types de tôles. Le modèle physique intègre les propriétés thermophysiques des matériaux, les conditions météorologiques horaires (rayonnement solaire, température d'air, convection) et tous les échanges thermiques. Une version modifiée de STARDIS traite spécifiquement les interruptions de chemins radiatifs par les bardages. Les simulations pour une après-midi ensoleillée montrent des réductions significatives de température de façade. Les résultats varient selon les paramètres : la couleur joue un rôle majeur, le pourcentage de vide influence l'ombrage, les nervures brise-soleil inclinées offrent les meilleures performances (jusqu'à -5°C). Une campagne de mesures in situ a été organisée à Saint-Dié-des-Vosges sur le site de Gantois Industrie. Le protocole teste simultanément plusieurs configurations : variation des motifs, des couleurs, de l'espacement au mur, présence de nervures, variation de l'inclinaison. Un système d'acquisition composé de thermocouples, de cartes multi-voies et d'anémomètres a permis de mesurer l'évolution temporelle des températures de façade et de tôles, ainsi que les vitesses d'écoulement d'air, sur deux journées complètes. La comparaison numérique/expérimentale permettra de valider le modèle et d'identifier les paramètres clés optimisant les performances. Cette méthodologie vise à fournir un outil d'aide à la décision pour proposer des solutions adaptées selon la localisation géographique et les contraintes architecturales.

Modélisation de la convection externe autour des structures éphémères - Construction d'un modèle compact pour la convection naturelle et la convection forcée

Grégory Millot^{1,*}

* ✉ : gregory.millot@capgemini.com

¹ Capgemini Engineering

Mots clés : convection, CFD, structures éphémères

Résumé :

Les structures éphémères sont généralement chauffées par des générateurs d'air chaud alimentés au fioul. Le projet Vers un Ephémère Durable est subventionné par le programme Alternatives Vertes pour les Industries Culturelles et Créatives et vise à réduire les émissions carbone de ces structures. Ces structures n'étant pas isolées par nature, les pertes thermiques par convection externe constituent un poste majeure qu'il convient de modéliser finement afin d'étudier le comportement thermique de l'ensemble. En fonction des conditions extérieures de température et de vent, la convection externe peut s'établir en différents régimes, de la convection naturelle à la convection forcée, en passant par de la convection mixte. Le problème est donc étudié au moyen d'analyse CFD 3D sous l'environnement Ansys Fluent. Les modélisations sont stationnaires avec le modèle de turbulence k-omega SST. Deux structures sont étudiées : un chapiteau de diamètre au sol de 37m et d'environ 6800m³ de volume intérieur, et une structure plus petite en losange de 176m² au sol et 739m³ de volume intérieur. Pour chaque structure, la convection est d'abord étudiée en régime de convection naturelle (variation de la différence de température entre la paroi et l'extérieur à faible vitesse de vent) ou en régime de convection forcée (variation de la vitesse de vent à faible écart de température). Pour la structure en losange, la convection forcée dépend également de la direction du vent. Pour une vitesse de vent donnée, des calculs sont donc également effectués avec une variation de la direction par pas de 10deg. Les corrélations unitaires du nombre de Nusselt avec le nombre de Rayleigh (convection naturelle) ou avec le nombre de Reynolds (convection forcée) sont vérifiées. Ensuite une troisième série de calculs permet d'effectuer des variations croisées Rayleigh/Reynolds et des corrélations compacts (équation mathématique continue unique) sont établies pour chacune des structures. Enfin, les corrélations obtenues en convection naturelle seront comparées aux modèles théoriques basés uniquement sur la définition géométrique des formes afin de conclure sur la possibilité d'extrapoler les résultats à des formes de structures quelconques.

Modélisation Hygrothermique Multi-échelle

Keovathana Run^{1,*}

* ✉ : keovathana.run@univ-cotedazur.fr

¹ LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

Mots clés : hygrothermique, énergétique, confort thermique, simulation numérique

Résumé :

Le projet INBUILT, financé par Horizon Europe et coordonné par UniCA, vise à accompagner la transition du secteur du bâtiment vers des solutions durables, circulaires et bas carbone. Il porte sur l'évaluation et la démonstration de dix produits et systèmes constructifs innovants, allant de matériaux recyclés et réemployés à des solutions issues de ressources bio- ou géo-sourcées. Dans ce cadre, ce travail propose une évaluation multi-critère de ces solutions, en combinant leur performance hygrothermique, énergétique et de confort thermique. L'objectif est de relier le comportement des matériaux à l'échelle de la paroi aux performances globales du bâtiment. L'approche repose sur une modélisation numérique couplée et s'appuie sur des données expérimentales issues de sites démonstrateurs pour la validation des modèles.

Towards High-Efficiency Greenhouse Design : Impacts of Argon-Filled Double Glazing on Climate Uniformity and Energy Consumption

Abderrahim Bazgaou^{1,*}, Aziz Benahmed, Hicham Fatnassi

* ✉ : a.bazgaou@uca.ac.ma

¹ LIREMET, Higher School of Technology, Cadi Ayyad University, Essaouira – Morocco

Mots clés : Covered crops, New greenhouse design, Environmental sustainability, Argon Double Glazing (ADG), Climatic factors, Greenhouse production cost.

Résumé :

Greenhouse modernization requires innovative solutions capable of balancing productivity and environmental sustainability. This study assesses the performance of Argon Double Glazing (ADG) as a covering material in greenhouse systems. Numerical simulations conducted with TRNSYS 18, supported by experimental observations, show that ADG improves the stability and homogeneity of key climatic variables while substantially reducing energy expenditure. Compared with traditional covers, ADG delivers superior thermal performance and contributes to cost-effective climate control strategies. The results support the integration of ADG in future sustainable greenhouse designs.

Thème 12

Transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement

Analyse expérimentale de la dynamique générée par un fort gradient de température volumique	124
Calcul précis et rapide du rayonnement thermique dans les gaz de combustion CO –H O pour les procédés industriels décarbonés	125
Développement auto-cohérent rapide des structures turbulentes dans les couches limites de convection naturelle à haute température	126
Étude de l'impact du vent sur la performance thermique et la capacité de collecte de rosée de condensateurs	127
Étude du risque d'endommagement des réseaux et équipements enfouis lors de feux de végétations	128
Mesure de la capacité thermique massique des métaux liquides par lévitation aérodynamique .	129
Méthode fiable d'estimation de la conductivité thermique de différents nano-fluides	130
Mise en place d'un dispositif de thermographie rapide pour la caractérisation thermique d'électrodes en coupure sous vide	131
Premiers spectres d'émissivité du tungstène après exposition dans le tokamak WEST	132
Reconstruction précise du flux thermique lors de l'impact d'une goutte par thermographie IR sur substrat chauffé en saphir.	133
Un couplage spectroscopie-transfert radiatif en four industriel : une approche sans approximation physique ni réduction de la donnée	134
Capteur Solaire Aérothermique LOW TECH	135
Modélisation des effets de vieillissement d'échangeur céramique poreux pour la récupération de chaleur fatale	136
Preliminary study on the effect of Temperature on the Sedimentation Process of Particulate Matter : An experimental comparison between Newtonian and non-Newtonian Fluids. . .	137
Suspensions de mMCP pour la gestion thermique	138
Transferts thermiques conjugués en conduction-convection forcée établie : un quadripôle thermique pour une couche fluide en proche paroi	139

Analyse expérimentale de la dynamique générée par un fort gradient de température volumique

Léa Cherry^{1,*}, Françoise Bataille¹, Gilles Flamant¹, Anita Haeussler¹, Mathieu Letzelter, Julien Manhes

* ✉ : lea.cherry@promes.cnrs.fr

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

Mots clés : thermique, convection, énergie solaire concentrée, nanofluide, instabilités

Résumé :

Les technologies solaires à concentration reposent sur la concentration du rayonnement solaire incident sur un récepteur où s'écoule un fluide caloporteur. Ce chauffage intense et asymétrique perturbe l'écoulement du fluide, mais les mécanismes physiques à l'origine de ces perturbations restent encore mal compris. Nous présentons une étude fondamentale des perturbations générées par un fort gradient de température volumique au moyen d'un dispositif expérimental original. Le dispositif expérimental est composé d'un nanofluide constitué d'une suspension de nanoparticules de graphène dans l'eau, capable d'absorber jusqu'à 85 % du rayonnement incident sur une épaisseur de 1 cm. Ce nanofluide est placé dans une cuve de 20 cm de diamètre et 1 cm d'épaisseur, puis positionné au foyer d'une parabole solaire de 1 kW. Il est soumis à un flash solaire bref (0,5 à 1,5 s), pouvant atteindre localement jusqu'à 10 MW/m² sur une zone d'environ 1 cm de diamètre. Ce flash génère un fort gradient de température entre la région irradiée et le reste du fluide, qui demeure proche de la température ambiante. La température du nanofluide est mesurée dans les secondes suivant le flash thermique grâce à une caméra infrarouge, afin d'observer et d'analyser la réponse du fluide au fort gradient de température imposé, et d'identifier les mécanismes de mise en mouvement du fluide. Une caméra visible est également utilisée pour mettre en évidence d'éventuels mouvements de la surface du fluide. Deux régimes distincts ont été identifiés selon l'énergie du flash : (1) un régime stable, où la chaleur se propage de manière homogène dans le fluide, (2) un régime instable, caractérisé par l'apparition de plumes horizontales à la surface du nanofluide, la formation de bulles dans la zone irradiée pendant le flash, et l'émergence de vagues concentriques à la surface. L'analyse des vitesses de déplacement des fronts de température pour chacun des deux régimes permet de conclure que la conduction pure ne domine dans aucun des deux régimes. Le fort gradient de température induit donc des transferts convectifs au sein du fluide pour tous les flashes testés. Des analyses complémentaires sont en cours afin d'identifier plus précisément les mécanismes physiques dominants dans le transport de chaleur pour chacun de ces régimes.

Calcul précis et rapide du rayonnement thermique dans les gaz de combustion CO –H O pour les procédés industriels décarbonés

Bowen Wang^{1,*}, Sylvain Contassot-Vivier, Fatmir Asllanaj¹, Fabien Pascale¹

* ✉ : bowen.wang@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Transfert radiatif, Modèle WSGG, Combustion propre, Simulation numérique

Résumé :

Face aux défis de neutralité carbone à l'horizon 2050, l'industrie lourde et les procédés thermiques sont particulièrement concernés, car ils reposent encore largement sur la combustion de charbon, de pétrole et de gaz naturel, responsables d'une part majeure des émissions de CO₂. L'une des voies de décarbonation les plus prometteuses consiste à substituer progressivement les énergies fossiles par exemple, par un mélange gaz naturel/hydrogène. Cependant, cette transition modifie fortement la composition des gaz de combustion, notamment les fractions molaires de CO₂ et de H₂O, et influence directement le transfert radiatif, qui reste un mode de transfert de chaleur dominant dans les systèmes et procédés à hautes températures. Les modèles radiatifs LBL (Line By Line) sont très précis mais beaucoup trop coûteux pour les simulations 3D de combustion turbulente. Pour un mélange de CO₂-H₂O, il y a typiquement 111 millions et 12 millions de raies pour H₂O et le CO₂, respectivement. Le modèle WSGG standard (Weighted-Sum-of-Gray-Gases) formulé couramment avec 4 gaz gris et une fenêtre de transparence est très rapide mais génère des erreurs trop importantes sur le calcul du terme source radiatif (Sr) et du flux radiatif (Qr). L'objectif de ce travail est le développement d'un modèle radiatif à la fois rapide et précis (basé sur l'approche WSGG à larges bandes), capable de simuler le rayonnement thermique des mélanges gazeux CO₂-H₂O issus de combustibles décarbonés. Le spectre total est subdivisé en 6 bandes (utilisant 1 gaz gris par bande) à l'aide de la méthode que nous avons développée pour identifier le découpage spectral optimal. Contrairement aux modèles WSGG standard, le poids d'émission est calculé directement à partir de la fonction de Planck, évitant ainsi d'introduire des paramètres d'ajustement pour ce coefficient. Les coefficients d'absorption de pression du mélange de gaz gris sont ajustés à l'aide d'un algorithme génétique, à partir des données LBL et HITEMP 2010, en minimisant une fonction objectif combinant les erreurs de Sr et Qr. Enfin, pour rendre ce modèle compatible avec des gaz issus de combustibles décarbonés (mélanges hydrogène et gaz naturel), nous avons introduit la dépendance du rapport de fraction molaire R (H₂O/CO₂) directement dans l'expression du coefficient d'absorption de pression. À ce stade de développement, le nouveau modèle peut être appliqué à des mélanges H₂O-CO₂ non isothermes et non homogènes, entre 300 K et 3000 K, et à pression atmosphérique. Lorsque le modèle est appliqué à une centaine de cas tests 1D, pour R=1 et R=2, les erreurs maximales normalisées restent inférieures à 7% pour Sr et 5% pour Qr, avec des erreurs moyennes inférieures à 3.7%. Des résultats de simulation du transfert radiatif pour différents mélanges d'hydrogène et gaz naturel seront présentés.

Développement auto-cohérent rapide des structures turbulentes dans les couches limites de convection naturelle à haute température

Thierry De Laroche Lambert^{1,*}

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

¹ Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

Mots clés : convection naturelle, turbulence, transition turbulente, couche limite, micro-échelles, autocorrélation, intercorrélation, analyse spectrale

Résumé :

Les processus physiques à l'œuvre dans les transitions des écoulements fluides d'un régime laminaire vers un régime pleinement turbulent sont particulièrement complexes et difficiles à appréhender expérimentalement pour valider les codes de simulation numérique de la convection naturelle à haute température. La méthode SWICTA (thermoanémométrie par intercorrélation à fenêtre glissante) basée sur l'analyse spectrale et corrélative conjuguée des mesures simultanées in situ des températures et vitesses locales au moyen d'une sonde ponctuelle unique en tout point d'une couche limite de convection naturelle fortement chauffée permet d'accéder à toutes les variables thermophysiques de l'écoulement pour décrire avec précision l'évolution de sa structure spatio-temporelle tout au long de la transition. L'analyse par méthode SWICTA des bases de mesures expérimentales obtenues pour une couche limite d'air le long d'une paroi verticale fortement chauffée jusqu'à 8000 W/m² permet d'obtenir une image précise du développement très rapide - de l'ordre de quelques secondes - d'une structure turbulente cohérente sur quelques dizaines de centimètres d'élévation de l'air ambiant, confirmée par les simulations DNS publiées. Elle conduit à la mise en évidence d'un processus naturel de sélection d'instabilités thermofluidiques de très basse fréquence, très rapidement converties en cascades de tourbillons dissipatifs conditionnés par les micro-échelles de turbulence de Taylor qui structurent très fortement la couche limite de bas en haut en une sous-couche interne - composée d'une sous-couche visqueuse contre la paroi, d'une sous-couche motrice et d'une sous-couche inertielle - et une sous-couche externe. L'analyse d'échelle de la couche limite à partir des équations thermofluidiques fournit les échelles caractéristiques turbulentes qui structurent la couche limite pendant toute la transition turbulente et explique les mécanismes produisant ces structures en un temps très court.

Étude de l'impact du vent sur la performance thermique et la capacité de collecte de rosée de condensateurs

Laurent Royon^{1,*}, Marc Muselli^{2,3}, Sylvain Lefavrais^{2,4}, Pedro Flores, Daniel Beysens^{2,4}

* ✉ : laurent.royon@u-paris.fr

¹ Laboratoire des Energies de Demain, 75013 Paris, France

² OPUR, 75016 Paris, France

³ Università di Corsica Pasquale Paoli, 20250 Corté, France

⁴ Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, 75005 Paris, France

Mots clés : thermique, condensation, froid radiatif, convection,

Résumé :

Dans le domaine de la récupération passive de l'eau atmosphérique, le comportement thermique des condenseurs plans destinés à la formation de rosée est principalement influencé par le refroidissement radiatif et par les échanges convectifs de chaleur avec l'air environnant. Cette étude examine les principaux facteurs affectant la formation de rosée sur une surface inclinée, en mettant particulièrement l'accent sur les effets de l'angle d'inclinaison, de la vitesse du vent et de sa direction. Des simulations numériques ainsi que des mesures expérimentales ont été réalisées sur un condenseur de 1 m² incliné à 30°, installé sur un site d'expérimentation bien caractérisé (Aéroport d'Ajaccio, France). Les températures de surface ont été enregistrées par thermographie infrarouge et par thermocouples, tandis que la quantité de rosée collectée a été mesurée à l'aide d'un pluviomètre et par des méthodes de collecte directe. Les résultats montrent que l'efficacité du refroidissement radiatif diminue nettement pour des angles d'inclinaison supérieurs à 20-30°, alors que l'efficacité de collecte de l'eau augmente avec l'inclinaison, pour atteindre des performances optimales autour de 30°. Les coefficients de transfert convectif ainsi que les volumes de rosée récoltés dépendent fortement de l'orientation du condenseur par rapport au vent : un vent de face favorise la condensation par rapport à un vent de dos, tout en produisant toutefois des rendements inférieurs à ceux observés pour un condenseur horizontal de référence. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent l'importance des interactions vent-surface dans les échanges thermiques air-surface et fournissent des éléments pratiques pour la conception et la modélisation de condenseurs plans efficaces pour la collecte de rosée.

Étude du risque d'endommagement des réseaux et équipements enfouis lors de feux de végétations

Idir Khaldi^{1,*}, Anthony Collin¹, Lucas Terrei¹

* ✉ : idir.khaldi@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Feux de végétations, température en profondeur, sol non-réactif

Résumé :

Les feux de végétation constituent une menace croissante dans un contexte de changement climatique, avec des impacts directs sur les infrastructures, les réseaux enterrés et les écosystèmes. Au-delà des dégâts visibles en surface, les températures élevées générées par un feu peuvent également atteindre le sous-sol et dégrader des équipements sensibles. Parmi les enjeux majeurs figurent notamment les réseaux enterrés d'eau, d'électricité ou de gaz constitués en polychlorure de vinyle (PVC) ou en polyéthylène haute densité (PEHD), dont les températures critiques de fonctionnement sont de 60 degC. S'ajoutent également les munitions héritées des conflits mondiaux, toujours présentes dans certaines régions françaises, dont la stabilité peut être compromise dès 120 degC. L'évaluation du risque thermique pour ces éléments enterrés demeure donc un enjeu de sécurité publique. Ce travail vise à analyser la propagation thermique dans un sol soumis à des flux radiatifs représentatifs de feux de végétation. La méthodologie s'appuie sur deux campagnes expérimentales complémentaires. La première est réalisée sur une table à brûler afin de caractériser la dynamique du front de flamme, les vitesses de propagation, les temps de résidence ainsi que les densités de flux thermiques réellement reçues par le sol. Différentes charges de combustible simulant des cultures céréalières (champ de chaume, champ de résidus et champ de récolte sur pied) ont été testées pour reproduire une variété de scénarios agricoles. Les mesures indiquent que les densités de flux reçues varient entre 20 et 50 kWm⁻², des valeurs en accord avec celles rapportées pour d'autres feux dans la littérature. La seconde campagne expérimentale est menée dans une cuve instrumentée remplie de sable (sol inerte), permettant de mesurer la diffusion de la chaleur en profondeur sous des densités de flux contrôlées (20, 40 et 50 kWm⁻²) appliquées pendant 12 minutes, durée majorante d'un front de flamme en mouvement dans un contexte de feu de culture. Les profils de température enregistrés montrent une forte atténuation de la propagation de la chaleur avec la profondeur. Sous une densité de flux sévère de 50 kWm⁻², la température de surface dépasse 700 degC, mais les augmentations significatives se limitent aux premiers centimètres du sol. Les seuils critiques de 60 degC pour les réseaux enterrés et de 120 degC pour les munitions ne sont franchis que dans les cinq premiers centimètres du sol, et uniquement pour les flux les plus élevés. Ces résultats confirment le rôle protecteur du sol avec la profondeur et montrent que les risques thermiques pour les infrastructures enterrées restent majoritairement concentrés dans les couches superficielles pour un sol inerte tel que le sable. Des investigations futures sur des sols réactifs (tourbe) et sur des sols multicouches permettront de généraliser ces conclusions et d'affiner l'évaluation des risques liés aux feux de végétation.

Mesure de la capacité thermique massique des métaux liquides par lévitation aérodynamique

Maelenn Le Mener^{1,*}, Mickaël Courtois¹, Elodie Courtois¹, Thomas Pierre¹, Coline Bourges¹

* ✉ : maelenn.le-mener@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

Mots clés : capacité thermique massique, lévitation aérodynamique, calorimétrie, absorptivité, métal liquide

Résumé :

Les propriétés thermophysiques des métaux liquides constituent un champ d'intérêt croissant pour la modélisation de nombreux procédés industriels. La capacité thermique massique est un paramètre important des transferts de chaleur, et très peu de données sont disponibles dans la littérature, en particulier au-delà de la température de fusion. En raison des difficultés dues à la phase liquide et aux hautes températures impliquées, des méthodes de caractérisation sans contact, comme la lévitation aérodynamique (ADL), sont développées. L'ADL permet d'atteindre de hautes températures (1 800 K - 3 300 K), d'éviter la contamination de l'échantillon et d'étudier tout type de matériau (diélectrique comme conducteur). Le chauffage par laser est en outre indépendant de la méthode de lévitation. Dans ce travail, un dispositif ADL est utilisé pour mesurer la capacité thermique massique de métaux liquides. La lévitation est assurée par un flux d'argon sous l'échantillon et un laser à fibre ytterbium est utilisé pour le chauffage. La modulation du laser permet de chauffer rapidement l'échantillon jusqu'à différents plateaux de température. La température est mesurée à l'aide d'un pyromètre trichromatique infrarouge maison tout au long de l'essai, incluant les phases de chauffage, de maintien en température et de refroidissement libre. L'idée principale de cette nouvelle méthode est de comparer deux phases de l'expérience à la même température : un plateau de température et le refroidissement correspondant. Comme ces deux phases sont à la même température, les pertes de chaleur (par convection et rayonnement) sont égales et peuvent être déterminées grâce au plateau. Cependant, cette méthode nécessite une connaissance précise de la puissance absorbée par l'échantillon. Pour résoudre ce problème, un pyromètre trichromatique dédié a été développé afin de mesurer à la fois la température et l'absorptivité (en supposant la loi de Kirchhoff) à la longueur d'onde du laser (1 070 nm). L'absorptivité est ainsi considérée dépendante de la température. Par ailleurs, la puissance laser est mesurée le long du trajet optique à chaque expérience afin d'obtenir la valeur exacte délivrée à l'échantillon. Une fois la puissance absorbée connue au plateau, la détermination des pertes convecto-radiatives devient possible. Ensuite, à partir de l'équation de la chaleur appliquée au refroidissement, la capacité thermique est déterminée. Connaissant le poids de l'échantillon, la capacité thermique massique est obtenue pour chaque valeur de température atteinte lors d'un plateau. La capacité thermique massique et l'émissivité à 1 070 nm de trois métaux liquides (fer, nickel, zirconium) ont été déterminées sur la plage de température 1 700 K - 2 400 K, comparées avec la littérature, et permettent de compléter des données très peu présentes au-delà de 2000K. Les avantages, limites et incertitudes de cette méthode sont discutés.

Méthode fiable d'estimation de la conductivité thermique de différents nano-fluides

Mohamed Amine Hermassi^{1,*}, Bertrand Garnier¹, Ahmed Ould El Moctar¹

* ✉ : mohamed-amine.hermassi@etu.univ-nantes.fr

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : Nano fluides, Conductivité thermique, Fil chaud, Quadrupôles, Estimation des paramètres

Résumé :

Au cours des années 2000, la communauté scientifique a consacré de nombreux travaux à l'étude des nano-fluides dans le but d'évaluer leurs performances thermiques liées à l'intensification des échanges fluide/paroi. Ces performances sont caractérisées notamment par leurs conductivités thermiques. Cependant, les résultats rapportés dans la littérature se sont révélés souvent divergents, suscitant d'importants débats quant à la réelle efficacité de ces nano-fluides [1]. Cette variabilité a mis en évidence la nécessité de disposer de méthodes de mesure de la conductivité thermique à la fois précises, reproductibles et fiables. C'est l'objectif de ce travail. Après une étude comparative de plusieurs techniques, nous avons retenu la méthode du fil chaud pour sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse expérimentale [2]. Le dispositif développé repose sur un fil d'Alumel faisant office à la fois d'élément chauffant et de capteur de température. La résistance du fil a été soigneusement étalonnée pour différentes puissances de chauffage et avec une plage de températures comprise entre 20 et 80 degC. L'estimation de la conductivité thermique des mesures s'appuie sur un modèle analytique formulé à l'aide de la méthode des quadripôles, permettant de décrire avec précision les transferts thermiques au sein du système 1D multicouche à géométrie cylindrique. Des simulations sous COMSOL ont permis de valider l'hypothèse d'effets de bord négligeables. Un algorithme d'estimation de paramètres utilisant le modèle analytique a ensuite été implémenté, intégrant plusieurs méthodes d'inversion numérique de la transformée de Laplace afin d'évaluer leur influence sur les valeurs de conductivité thermique obtenues. Une analyse d'incertitude sur les valeurs de conductivité thermique a été réalisée selon les travaux de Milošević [3]. Le modèle a été validé par des mesures réalisées sur de l'eau déionisée. Enfin, ce dispositif a été utilisé pour étudier la conductivité thermique de trois nano-fluides en fonction de la fraction volumique de nano-particules et de la température. Les écarts constatés entre les valeurs de modèles semi-empiriques de prédiction de la conductivité thermique en fonction de la fraction volumique de nanoparticules (modèles de Hamilton-Crosser, Maxwell...) et les résultats expérimentaux ont fait l'objet d'une analyse approfondie, permettant de mieux interpréter les tendances observées. [1] I. Gonçalves, et al., Applied Sciences, vol. 11, no. 6, p. 2525, 2021, doi : 10.3390/app11062525 [2] J.-P. Monchau, vol. 24, no. 1, pp. 97-103, 2017, doi : 10.1515/mms-2017-0009. [3] N. D. Milošević et M. Raynaud, Proc. 3rd Int. Conf. Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE 2002), pp. 1-8, 2002.

Mise en place d'un dispositif de thermographie rapide pour la caractérisation thermique d'électrodes en coupure sous vide

Deniz Libert^{1,2,*}, Coline Bourges¹, Mickaël Courtois¹, Stephen Cadiou, Muriel Carin, Flavien Valensi, Philippe Teulet, Jérôme Douchin, Anthony Papillon

* ✉ : deniz.libert@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

² LAPLACE, UMR CNRS 5213, Université Paul Sabatier, Toulouse, France

Mots clés : Rayonnement, Thermographie rapide, Etalonnage, Plasma métallique, Disjoncteur

Résumé :

Les disjoncteurs assurent la sécurité du réseau électrique, permettent le passage du courant en fonctionnement normal et l'interruption en cas de défaut. Historiquement, cette coupure s'effectuait dans le SF₆, un gaz dont l'impact climatique est majeur (1 kg SF₆=25 t CO₂). Pour atteindre la neutralité carbone, les constructeurs migrent vers la coupure sous vide pour les disjoncteurs moyenne tension (1 à 50 kV). Cette rupture technologique soulève des défis : les essais sont coûteux et la physique de l'arc sous vide (interaction contact/plasma) reste mal connue. Les performances semblent fortement corrélées à la température des électrodes, d'où la nécessité de la mesurer en conditions réelles. Cette étude porte sur la mise en place d'un banc d'essais permettant, entre autres, la mesure de température des surfaces des électrodes lors de la coupure des disjoncteurs sous-vide. La mesure est particulièrement complexe : le phénomène est très rapide (arc <10 ms, refroidissement immédiat), très énergétique (températures >2000 C) et se déroule dans un environnement instable (plasma métallique, arc non stationnaire). Pour relever ce défi, nous avons conçu un banc d'essais basé sur une maquette en croix reproduisant la géométrie des disjoncteurs, intégrant des périscopes et des caméras pour une thermographie à distance dans le visible et le proche infrarouge. Les longueurs d'ondes retenues tiennent compte des limitations des capteurs et de l'émission propre du plasma (CuCr). Un étalonnage ex-situ a été réalisé avec un corps noir de type cavité pour une émissivité proche de 1, couvrant une plage de température entre 1400 C et 2400 C. Cet étalonnage permet de convertir des niveaux de gris (Digital Levels : DL) en température. Nous avons appliqué une loi de type Planck, intégrant le temps d'obturation (Integration Time : IT) pour accéder à des températures élevées (IT=50 us) et plus faibles (IT=500 us) avec une seule loi d'étalonnage. L'étalonnage a été validé sur les températures de solidification de corps purs (Fe, Ni). Des essais in-situ ont été réalisés sur des contacts dont l'émissivité avait été préalablement mesurée pour différentes températures. Connaissant les transmittances et réflectances des différents objets constituant les chemins optiques, nous avons corrigé les mesures des DL, puis nous les avons convertis en utilisant la loi établie lors de l'étalonnage pour obtenir la température réelle des électrodes lors de la coupure. Les mesures obtenues lors des coupures d'arc (durée <10 ms, températures >2000 C) sont cohérentes avec la littérature. Cette méthodologie démontre la faisabilité d'une thermographie rapide (10000 fps caméra visible et jusqu'à 3500 fps caméra IR) en environnement plasma instable, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des mécanismes de coupure sous vide. Ces résultats constituent une étape clé pour optimiser les disjoncteurs sans SF₆ et contribuer à la décarbonation des réseaux électriques.

Premiers spectres d'émissivité du tungstène après exposition dans le tokamak WEST

Estelle Romulus^{1,*}, Nathalie Ehret¹, Jean-Laurent Gardarein¹, Jonathan Gaspar¹, Céline Martin², Mathilde Diez³

* ✉ : estelle.romulus@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

² Aix Marseille Univ, CNRS, PIIM, Marseille, France

³ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

Mots clés : émissivité, tokamak, banc de mesure d'émissivité

Résumé :

Dans le domaine de la fusion nucléaire, les environnements extrêmes des tokamaks, tels que WEST, soumettent les composants face au plasma à de forts flux de chaleur et de particules de l'ordre de 10 MW/m². L'interaction du plasma avec la paroi interne du tokamak est responsable de la montée en température des composants, qui sont activement refroidis pour évacuer la chaleur. Un contrôle en temps réel de la température des composants est nécessaire pour éviter leur endommagement. À ce titre, la thermographie infrarouge (IR) est couramment utilisée pour assurer le contrôle de température de ces composants. Elle repose sur l'utilisation de caméras IR équipées de filtres étroits centrés sur une longueur d'onde du domaine IR. Cependant, l'utilisation de composants en tungstène (W) activement refroidis dans WEST rend difficile le suivi de température en raison de la faible émissivité du W ($\epsilon = 0,1$). De plus, celle-ci peut varier au sein d'un même composant en raison des phénomènes de déposition et d'érosion induits par l'interaction plasma-paroi. Cela induit des changements d'état de surface qui nécessitent une compréhension approfondie de l'évolution de l'émissivité des composants dans la machine. Dans ce but, des études précédentes ont mis en évidence des zones spécifiques de forte érosion et de déposition, entraînant une variation importante de l'émissivité. Une diminution de l'émissivité de 0,12 jusqu'à 0,05 est observée dans les zones de forte érosion, tandis que dans les zones de déposition elle augmente jusqu'à 0,85. Bien que ces études apportent des informations sur la variation d'émissivité, elles ciblent uniquement les longueurs d'onde des caméras IR du tokamak, centrées sur 3,9 $\pm$ 0,250 μ m. L'objectif de ce travail est d'étendre le domaine d'étude spectrale entre 2,5 et 15 μ m jusqu'à 400 degC, afin d'étudier l'évolution de l'émissivité des composants en fonction de leur état de surface et de mettre en évidence des comportements/caractéristiques spécifiques pour faciliter la mesure de température dans le tokamak WEST. Dans ce contexte, un banc équipé d'un spectrophotomètre à transformée de Fourier a été spécialement développé pour l'étude des composants en W provenant de WEST. Après une rapide présentation de ce banc, les spectres obtenus sur des zones d'érosion et de redéposition seront présentés et discutés. En parallèle, une caractérisation des zones de redéposition (rugosité et composition chimique) a été menée afin de relier l'état de surface aux spectres d'émissivité.

Reconstruction précise du flux thermique lors de l'impact d'une goutte par thermographie IR sur substrat chauffé en saphir.

Thomas Potaufoux^{1,*}, Ophélie Caballina¹, Guillaume Castanet¹, Thierry Czerwiec²

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

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

² Institut Jean Lamour

Mots clés : Problème inverse, Reconstruction de flux thermique, Correction d'émission photonique, Impact de goutte, Thermographie infrarouge

Résumé :

La pulvérisation liquide permet une dissipation thermique efficace, mais ses mécanismes restent difficiles à analyser. L'étude de l'impact d'une goutte unique par thermographie infrarouge offre un accès non intrusif aux champs de température. Toutefois, la mesure à travers un substrat en saphir est limitée par son émission propre et son absorption radiative. Des méthodes correctives simples améliorent partiellement la précision, mais présentent des limites selon les conditions expérimentales. Une approche couplant conduction et rayonnement via la méthode des quadripôles thermiques permet une reconstruction rapide et précise du flux thermique, avec un gain de précision pouvant atteindre plusieurs dizaines de pour cent.

Un couplage spectroscopie-transfert radiatif en four industriel : une approche sans approximation physique ni réduction de la donnée

Antoni Augé^{1,*}, Olivier Farges², Yaniss Nyffenegger-Péré², Olivier Rozenbaum¹, Christophe Coustet³, Mégane Bati^{4,5}, Vincent Eymet³, Vincent Forest³, Louis Piquard⁶

* ✉ : antoni.auge@cnrs-orleans.fr

¹ Université d'Orléans, CNRS, CEMHTI, UPR 3079, Orléans, France

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

³ Méso-Star SCOP SAS

⁴ IRIT, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, Toulouse, France

⁵ LAPLACE, UMR CNRS 5213, Université Paul Sabatier, Toulouse, France

⁶ Constellium Technology Center (C-TEC), Voreppe, France

Mots clés : Transfert radiatif, Raie-par-raie, Line Sampling, Monte-Carlo, Spectroscopie, Émissivité, Combustion, Thermique, Rayonnement, Four industriel

Résumé :

La modélisation des transferts radiatifs dans les fours industriels, caractérisés par des gaz semi-transparentes à haute température, est essentielle pour améliorer leur efficacité énergétique. Ce travail propose une méthode innovante basée sur le Monte-Carlo Line Sampling qui résout l'équation de transfert radiatif sans approximation physique, en couplant le suivi des photons à un modèle raie-par-raie pour l'absorption des gaz. Grâce à l'utilisation de la base spectroscopique HITEMP2010 et à une reformulation probabiliste optimisée, le temps de calcul d'un flux pariétal est réduit à quelques secondes, indépendamment de la complexité géométrique du four. L'approche ouvre des perspectives d'optimisation énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Capteur Solaire Aérothermique LOW TECH

Pascale Bouvier^{1,*}, Noury Bouraqadi¹

* ✉ : pascale.bouvier@junia.com

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

Mots clés : Low Tech, Energie Renouvelable, Capteur solaire aérothermique, intensification des transferts

Résumé :

Les collecteurs aérothermiques constituent une solution prometteuse pour le chauffage solaire de l'air, en particulier pour des applications de séchage, de ventilation ou de préchauffage. Leur performance dépend fortement de la conception géométrique (forme du canal, chicane, ailettes, inclinaison, nombre de passes d'air, etc.) et des conditions de fonctionnement (vitesse de l'air, rayonnement solaire). L'idée derrière ce projet est d'étudier la mise en œuvre d'un tel capteur en adoptant une approche « Low Tech ». C'est une approche dont l'impact environnemental est faible, accessible au plus grand nombre, réparable et durable. Il s'agit donc d'un capteur qui serait construit à partir de matériaux à la fois bio-sourcés et locaux. La conception doit être simple afin que le capteur soit réalisable avec des outils disponibles pour le grand public. Cette première version est vraiment simple et consiste à fixer le contexte. L'objectif, à terme, est d'avoir de plus en plus de matériaux locaux, de trouver les techniques d'intensification performantes et robustes, prenant en compte des outils numériques et expérimentaux comme par exemple le rendement, les performances thermo-hydrauliques, les champs de vitesse et de vorticité locale et globale pour un ensemble de débits afin d'identifier les mécanismes physiques qui entrent en jeu.

Modélisation des effets de vieillissement d'échangeur céramique poreux pour la récupération de chaleur fatale

Amandine Pinheiro^{1,*}, Olivier Farges¹, Olivier Rozenbaum²

* ✉ : amandine.pinheiro@univ-lorraine.fr

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

² Université d'Orléans, CNRS, CEMHTI, UPR 3079, Orléans, France

Mots clés : rayonnement, atmosphère réactive, dépendance spectrale, monte-carlo, transfert de chaleur couplés, mousse céramique, milieu semi-transparent, chaleur fatale, complexité, vieillissement

Résumé :

Dans un contexte de décarbonation de l'industrie, la récupération de chaleur fatale constitue un levier majeur pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés à très haute température. Ce travail, mené dans le cadre du projet ANR ACACIA et du laboratoire commun Canopée, porte sur la modélisation et l'analyse des transferts de chaleur couplés dans des échangeurs poreux en céramique AZS (Alumine-Zircone-Silice) destinés à ces applications industrielles au-delà de 1000°C. Ces matériaux semi-transparents représentent une alternative prometteuse aux systèmes conventionnels grâce à leur structure à forte surface spécifique, permettant une interaction optimale entre le flux gazeux chaud et le matériau. Conçus pour minimiser les pertes de charge tout en maximisant l'absorption thermique, ces dispositifs favorisent un transfert de chaleur efficace par conduction, convection et rayonnement, et sont particulièrement adaptés aux environnements extrêmes des fours industriels. L'approche numérique repose sur la méthode de Monte-Carlo, choisie pour sa capacité à traiter de multiples complexités sans augmentation prohibitive du temps de calcul. Cette méthode présente trois avantages majeurs : elle est insensible à la complexité spatiale et peut ainsi intégrer une modélisation fine des géométries, du plus petit pore de l'échangeur jusqu'à la structure complète du four ; elle est insensible à la complexité temporelle, le temps de calcul restant identique qu'il s'agisse d'une étude sur deux jours ou deux ans ; elle est insensible à la complexité phénoménologique et spectrale, permettant de traiter rapidement les transferts de chaleur couplés (conduction, convection et rayonnement) en milieu participant (gaz à haute température), tout en incluant la dépendance spectrale des phénomènes sans modification du temps de calcul. Un enjeu majeur concerne l'intégration dans le modèle des variations temporelles des propriétés optiques et thermophysiques de l'échangeur, résultant du vieillissement du matériau en atmosphère réactive. Un volet expérimental s'intéresse précisément à la caractérisation de ce vieillissement en conditions représentatives de l'utilisation industrielle (dépôt de suies, réactions chimiques, corrosion). Un code préliminaire a été développé pour valider l'approche méthodologique. Il modélise actuellement les transferts radiatifs dans une géométrie simple (cube avec une paroi noire et cinq parois avec propriétés spectrales) et retourne le flux reçu à un point sonde. L'objectif premier est l'intégration de la variation temporelle des propriétés du matériau : l'absorption et la réflectivité spéculaire des parois varient temporellement et spectralement selon une équation non-linéaire. Le code inclura progressivement des géométries de plus en plus complexes (échangeur puis système complet). À terme, les données de caractérisation expérimentale permettront de modéliser fidèlement la modification de l'état de surface de l'échangeur au cours du temps.

Preliminary study on the effect of Temperature on the Sedimentation Process of Particulate Matter : An experimental comparison between Newtonian and non-Newtonian Fluids.

Fareed Hussain Mangi^{1,*}, Michelle Mattos¹

* ✉ : fareed.mangi@berlinsbi.com

¹ Berlin School of Business and Innovation (BSBI), Berlin, Germany

Mots clés : Particulate Material, Sedimentation, Thermal convection, Laminar Flows

Résumé :

Étude préliminaire de l'effet de la température sur le processus de sédimentation des particules : une comparaison expérimentale entre des fluides newtoniens et non newtoniens. Michelle Mattos^{1,2}, Luís Américo Calçada², Rodrigo Borges², and Fareed Hussain Mangi¹. 1 Faculty of Computer Science and Informatics, Berlin School of Business and Innovation BSBI, Berlin, Germany 2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, UFRRJ, Seropédica, Brazil. La convection thermique pendant la sédimentation des particules est souvent sous-estimée en ingénierie, car les modèles simplifiés ne tiennent généralement pas compte de l'effet réel des différences de température sur le comportement du fluide. Pourtant, un simple gradient thermique peut modifier la densité du fluide, créer des courants de convection naturelle et changer de manière notable la façon dont les particules se déposent. Dans cette étude, nous avons cherché à mieux comprendre comment la convection thermique influence la sédimentation, en combinant des expériences en laboratoire avec une analyse théorique simple. Les essais ont été réalisés avec de la calcite (CaCO_3) et de la baryte (BaSO_4), mises en suspension dans l'eau et dans des solutions de carboxyméthylcellulose (CMC) à 0,4 lb/bbl et 0,8 lb/bbl. Le dispositif expérimental était volontairement minimaliste : un bécher équipé de deux thermomètres analogiques, l'un en haut et l'autre en bas, pour suivre à la fois le gradient de température et la descente de l'interface solide-liquide au fil du temps. Les expériences ont été menées à température ambiante ($\sim 25^\circ\text{C}$), avec un chauffage par la base, et sous chauffage uniforme à 50°C dans une étuve. Les mesures ont montré un nombre de Reynolds extrêmement faible, de l'ordre de 10^{-4} , indiquant un écoulement parfaitement laminaire autour des particules. Les nombres de Prandtl, compris entre 0,14 et 0,32, ont permis de mieux comprendre la relation entre la diffusion de chaleur et la diffusion de quantité de mouvement dans ces conditions. Dans tous les cas, la conductivité thermique des solides s'est révélée déterminante, influençant directement la sensibilité de la sédimentation aux variations de température. Mots-clés : Matériaux particulaires ; Sédimentation ; Convection thermique ; Écoulements laminaires.

Suspensions de mMCP pour la gestion thermique

Amira M'Hadbi^{1,*}, Laurent Royon², Imane Bouccena, Tom Lacassagne¹, S.Amir Bahrani¹

* ✉ : amira.mhadbi@imt-nord-europe.fr

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

² Laboratoire des Energies de Demain, 75013 Paris, France

Mots clés : convection, matériaux à changement de phase, stockage thermique, suspensions, thermo-rhéologie

Résumé :

Contexte : Les data centers sont aujourd'hui de véritables sources génératrices de chaleur. L'énergie électrique consommée par les serveurs est presque entièrement transformée en chaleur, qui doit être évacuée en continu pour garantir le bon fonctionnement et la durabilité des équipements. Cette contrainte a conduit à l'évolution des technologies de refroidissement et au développement de solutions de valorisation de la chaleur fatale, notamment via des fluides caloporteurs. Dans ce cadre, cette étude porte sur un fluide innovant à double fonction : vecteur de chaleur et moyen de stockage thermique. Cette propriété repose sur l'intégration de microcapsules contenant un matériau à changement de phase solide-liquide, capable d'absorber et restituer efficacement l'énergie thermique. Objectif : Notre étude concerne une suspension de matériaux à changement de phase sous forme de microcapsules. Elle vise à analyser la stabilité et les propriétés d'écoulement de ce fluide diphasique, capable de stocker l'énergie sous forme de chaleur latente. L'objectif est d'évaluer ses performances et de déterminer une concentration optimale en microparticules, assurant un compromis entre bonne fluidité et capacité de stockage thermique. Méthode et analyses : La stabilité des suspensions de μ MCP est d'abord examinée par observation visuelle de la stratification, selon un protocole expérimental permettant d'identifier les phénomènes de sédimentation et de séparation de phases en fonction de la concentration en particules. Cette approche est complétée par des mesures quantitatives de turbidité, utilisées pour suivre l'évolution de la dispersion au fil du temps et caractériser les mécanismes d'agrégation. Les propriétés thermo-rhéologiques des matériaux sont étudiées à l'aide d'un rhéomètre, via des essais en balayage de température sous gradient de cisaillement imposé. Des études en régime oscillatoire sont également réalisées afin de caractériser la réponse sur une large plage de fréquences. L'ensemble de ces analyses permettent de quantifier le comportement des suspensions soumises à des cycles thermiques sous écoulement dans leur utilisation pratique. À l'aide d'un dispositif expérimental maintenant le fluide au repos, la cinétique de fusion est étudiée. Les résultats sont comparés à des simulations issues d'un modèle phénoménologique basé sur trois temps caractéristiques, afin d'estimer la durée des changements de phase en conditions statiques. Une attention particulière est portée à l'effet de la fraction massique en μ MCP dans les suspensions, en évaluant son influence sur la stabilité et les propriétés rhéologiques. Cette analyse permet de mieux comprendre les mécanismes d'écoulement thermo-convectif. Enfin, le travail vise à évaluer la pertinence du modèle proposé et à identifier des axes d'optimisation pour développer des fluides caloporteurs plus performants.

Transferts thermiques conjugués en conduction-convection forcée établie : un quadripôle thermique pour une couche fluide en proche paroi

Denis Maillet^{1,*}

* ✉ : denis.maillet@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : transfert thermique conjugué, interface solide-écoulement, quadripôle thermique, coefficient d'échange, transformées intégrales

Résumé :

Le coefficient de transfert de chaleur h , associé au seul écoulement, n'est pas toujours légitime, par exemple pour un écoulement lent sur une paroi solide très conductrice : h dépend alors non seulement du champ des vitesses et des propriétés thermophysiques du fluide, mais aussi de celles du solide. Lorsque l'on cherche à simuler les transferts de chaleur entre deux solides différents, la méthode des quadripôles thermiques permet une résolution rapide et analytique des transferts permanents ou transitoires dans des milieux multicouches à interfaces multiples, par l'intermédiaire de multiplication de matrices 2×2 intrinsèques à chaque couche. Il faut alors travailler avec des transformées intégrales (Laplace, Fourier, ...) reliant les vecteurs des transformées des températures et densités de flux sur chacune des faces externes du système, les retours dans les espaces originaux étant semi-analytiques. Cette approche est utilisée ici pour une couche fluide. On utilise un développement de Taylor du profil normal de vitesse au voisinage de la paroi. Chacun des 4 coefficients de la matrice quadripolaire est exprimé analytiquement en fonction des coefficients de cette série. Cette matrice fluide est multipliée par la matrice solide sous-jacente correspondante, ce qui permet de résoudre le transfert de chaleur conjugué, quelles que soient les deux conditions aux limites aux bornes de ce système. Les principes de cette modélisation, où plusieurs points restent à étudier (rayon et vitesse de convergence des séries) seront présentés ici. Cette méthode reste à être vérifiée par comparaison avec des simulations numériques dans des configurations identiques. Les applications envisagées concernent de nombreux problèmes de transferts thermiques conjugués pour les transferts pariétaux, notamment transitoires : mini canal plan de refroidissement en électronique ou en échangeur à plaque, sous couche laminaire en écoulement externe établi et turbulent en météorologie ou aéronautique ...

Thème 13

Transferts de masse et de chaleur en milieux poreux

Conditions de formations de zones sèches dans un substrat capillaire pour le rafraîchissement adiabatique indirect.	142
Coupling of heat and mass transfers in bio-based construction materials	143
Effet de transport de gaz dans un milieu poreux induit par une différence de température . . .	144
Vers un modèle thermo-hydrigue de sol pour application urbaine : développement numérique et premières confrontations à des mesures de terrain.	145
Analyse expérimentale des effets séparés de la mésostructure et du gaz interstitiel sur la conductivité thermique des milieux granulaires	146
Caractérisation de la contamination cationique dans les membranes échangeuses de protons par spectroscopie infrarouge.	147
Comportement hygro-thermique des isolants bio-sourcés : de la métrologie sans effets de bord aux effets de porosité, d'orientation de fibres et d'humidité	148
Étude de stockage de la chaleur fatale issue de procédés industriels à hautes températures en lit fluidisé	149
Étude expérimentale du transfert de chaleur par changement de phase dans un milieu poreux avec une configuration à ménisque inverse	150
Heat and Mass Transfer in a Capillary Porous Structure Infiltrated with Liquid Metal	151

Conditions de formations de zones sèches dans un substrat capillaire pour le rafraîchissement adiabatique indirect.

Antonin Dulac^{1,*}, Florine Giraud¹, Benoit Stutz¹, David Cloet¹, Arnaud Didier¹, Sabine Zins¹

* ✉ : antonin.dulac01@gmail.com

¹ LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc (USMB), CNRS UMR5271

Mots clés : substrat capillaire, rafraîchissement adiabatique

Résumé :

Les systèmes de rafraîchissement adiabatiques sont intéressants par rapport aux systèmes de climatisation classiques par leur consommation en énergie réduite. Le rafraîchissement adiabatique indirect a pour avantage de ne pas humidifier l'air entrant par rapport aux systèmes directs en humidifiant l'air extrait. Le système élémentaire est constitué de deux canaux séparés par une paroi. L'air humide extrait du bâtiment circule dans le canal humide dans lequel un substrat capillaire permet d'apporter de l'eau. L'air extrait évapore de l'eau du substrat capillaire et fait baisser la température de la paroi. De l'autre côté de la paroi dans le canal sec circule l'air entrant. Cet air est alors rafraîchi au contact de la paroi puis injecté dans l'habitation. Ce type de système est néanmoins sujet à des problématiques d'assèchement du substrat capillaire apportant l'eau. Il a été remarqué que les caractéristiques de l'air impactent cet assèchement. Un banc expérimental reproduisant un demi-canal dans lequel circule l'air humide extrait a été utilisé afin de réaliser une étude paramétrique sur les conditions d'entrée de l'air humide (conditions représentatives des conditions retrouvées à l'intérieur d'une habitation). Ce banc permet aussi d'accéder aux températures et aux humidités relatives selon un maillage de 15 capteurs dans la veine d'air. Les paramètres étudiés sont : l'humidité relative, le débit d'air, la puissance de chauffe, et la température en entrée de la veine ainsi que la distance du réservoir d'eau à la veine. Afin de qualifier l'impact de chacun de ces paramètres sur la dynamique d'imbibition et d'assèchement du substrat capillaire, deux protocoles sont adoptés : une méthode consiste à laisser l'air se stabiliser en entrée avant d'humidifier le substrat capillaire, l'autre consiste à imbiber complètement le capillaire avant d'introduire l'air aux conditions désirées. Les résultats montrent les conditions de formation de zones d'assèchements du substrat capillaire. La dynamique des phénomènes thermiques et de transport de masse est aussi étudiée.

Coupling of heat and mass transfers in bio-based construction materials

Van Truong Nguyen^{1,*}, Philippe Coussot, Rahima Sidi Boulenouar²

* ✉ : van-truong.nguyen@univ-eiffel.fr

¹ Université Gustave Eiffel

² Laboratoire Navier, Ecole des ponts, Univ. Gustave Eiffel, CNRS

Mots clés : Transfert de chaleur, Transfert de masse, Hygroscopique

Résumé :

Les fibres naturelles telles que le lin, le chanvre, le coton et le bois sont de plus en plus utilisées comme matériaux isolants écologiques grâce à leur capacité à réguler l'humidité tout en conservant une faible conductivité thermique. Cependant, le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans ces milieux poreux anisotropes reste difficile à caractériser et à simuler. Pour y remédier, nous proposons des expériences unidimensionnelles (1D) contrôlées dans lesquelles le transport de chaleur et de masse se produit le long d'un seul axe, ce qui facilite à la fois la modélisation et la validation. À l'aide d'échantillons de cellulose de différentes tailles, nous analysons le refroidissement transitoire et introduisons le concept de conductivité thermique virtuelle, définie comme la propriété effective qui concilie les solutions analytiques 1D avec les données expérimentales. Cette méthode est ensuite testée sur d'autres isolants d'origine biologique et dans différentes conditions limites. Des simulations numériques systématiques quantifient en outre les écarts par rapport au transport 1D idéal dans des géométries de type mural. Les résultats établissent des conditions expérimentales générales pour l'étude du transfert couplé de chaleur et de masse dans les matériaux de construction biosourcés, fournissant ainsi une base pour une simulation et une conception plus fiables des enveloppes de bâtiments durables.

Effet de transport de gaz dans un milieu poreux induit par une différence de température

Junhao Tu^{1,*}, Frédéric Topin¹, Emil Grigorov¹, Irina Graur¹, Pierre Perrier¹

* ✉ : junhao.tu@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

Mots clés : microfluidique, milieux poreux, gaz raréfiés, expérimental

Résumé :

Notre sujet de recherche a pour objectif d'étudier les effets dans le transport des gaz dans un milieu poreux, induit par une différence de température. Également appelé thermal creep ou thermal transpiration, ce phénomène joue un rôle essentiel dans les réacteurs chimiques gazeux avec des membranes catalytiques. Cette étude nous permet de mieux caractériser ces membranes, afin de trouver une structure poreuse optimale pour intensifier les flux gazeux dans le réacteur. Notre échantillon est fabriqué à partir de fibres optiques en verre, contenant 60 tubes chacune. Nous avons moulé 60 fibres parallèles dans un tube en verre de 5cm de long. Nous obtenons ainsi un poreux de 6mm de diamètre constitué de 3600 capillaires de diamètre 6 microns et de longueur 5cm. Une température est imposée à chaque extrémité du poreux, créant ainsi un profil linéaire le long de son axe puisque la surface latérale est isolée. Nous souhaitons mesurer le débit de thermal creep (du côté froid vers le côté chaud) créé par ce gradient de température. Il est malheureusement trop faible pour être mesuré directement. Nous avons choisi de mesurer la variation de pression dans deux réservoirs placés de part et d'autre du poreux. Nous disposons d'une expression théorique reliant le débit à l'écart de pression atteint en régime stationnaire et au temps caractéristique de l'écoulement, pour tirer parti de cette relation. Un dispositif expérimental constitué d'un réservoir et un capteur de pression à chaque extrémité de l'échantillon ainsi qu'un capteur différentiel entre les réservoirs est utilisé. La régulation de la température se fait par des échangeurs connectés à deux bain thermostats, avec plusieurs thermocouples sur différentes positions pour évaluer le profil de température dans le dispositif. La température est contrôlée dans chacun des réservoirs, et nous mesurons les pressions absolues et la pression différentielle entre les réservoirs. Les deux réservoirs sont connectés par un bypass pilotable. À partir d'une pression initiale homogène (bypass ouvert), nous observons le transport de gaz d'un réservoir vers l'autre en fermant le bypass. Une étude systématique de l'influence du niveau de pression pour deux gaz (Ar et CO₂) a été réalisée. Pour ce dernier, nous avons analysé de plus l'influence de l'écart de température. L'ensemble de nos résultats sera discuté et comparé à ceux (théoriques et expérimentaux) disponibles dans la littérature.

Vers un modèle thermo-hydraulique de sol pour application urbaine : développement numérique et premières confrontations à des mesures de terrain.

Ossama Lazrak^{1,*}, Jérôme Vicente¹, Fabrice Rigollet^{1,2}, Thomas Fasquelle¹

* ✉ : ossama.lazrak@univ-amu.fr

¹ Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

² Aix Marseille Université

Mots clés : Modélisation microclimatique, transferts thermo-hydrauliques du sol, équation de Richards, modélisation numérique, évaporation et flux de surface, mesures de terrain.

Résumé :

CityVox est un modèle de microclimat urbain en cours de développement, visant à combiner la reconstruction géométrique issue de données LiDAR et la simulation physique des échanges thermiques et hydriques à l'échelle locale. La démarche consiste à construire et valider progressivement chaque composant du modèle. Le premier bloc étudié concerne le sol, où les transferts de chaleur et d'humidité conditionnent fortement la température de surface. Dans ce modèle, l'équation de la chaleur et l'équation de Richards (forme mixte) sont résolues séparément à l'aide d'un schéma implicite en différences finies et de l'algorithme tridiagonal de Thomas, avec la formulation hydraulique de van Genuchten et des itérations de Picard pour la convergence non linéaire. Ce travail présente une première comparaison entre les simulations d'un modèle de référence (HYDRUS1D), celles du modèle développé, et les mesures extérieures réalisées sur un sol naturel du campus de Polytech Marseille, équipé d'une station météorologique, d'un radiomètre et d'une sonde combinée de température et d'humidité. Cette configuration expérimentale permet de tester la validation du modèle sous forçage atmosphérique réel avant son application à des surfaces urbaines. D'une façon surprenante, les comparaisons expérimentales des modèles thermiques et hydriques de sol à des données de terrain sont encore très rares, ce qui fait l'innovation de ce travail. Les premiers résultats sont cohérents mais certains comportements sont difficiles à représenter numériquement, en raison de l'hétérogénéité des sols, des nombreuses inconnues et des couplages thermo-hydrauliques.

Analyse expérimentale des effets séparés de la mésostructure et du gaz interstitiel sur la conductivité thermique des milieux granulaires

Delphine Esmiol^{1,*}, Nathalie Ehret², Jean-Laurent Gardarein², Fabrice Rigollet^{2,3}, Jean-Mathieu Vanson¹, Fabien Bernachy-Barbe¹

* ✉ : delphine.esmiol@cea.fr

¹ CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

² Aix Marseille Université, CNRS IUSTI, Marseille, France

³ Aix Marseille Université

Mots clés : conduction, milieux granulaires, conductivité thermique effective

Résumé :

Pour les Réacteurs à Eau Pressurisée, la prédiction du comportement du combustible nucléaire en situation d'accident hypothétique constitue un enjeu majeur de sûreté. Lors d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire, le combustible sous forme de pastille peut se fragmenter et former des empilements granulaires immergés dans un gaz. Ainsi, la compréhension fine des mécanismes de transfert thermique au sein de tels milieux hétérogènes permet d'améliorer la prédictibilité des lois de conductivité thermique utilisées dans des codes de performance. Les propriétés thermiques des milieux granulaires dépendent étroitement de la compacité et de la nature des contacts entre particules. La littérature traite largement des mécanismes de transfert de la chaleur dans ces milieux, ainsi que de la fragmentation du combustible et des granulométries obtenues. L'originalité de ce travail réside dans une approche expérimentale à effets séparés sur matériaux simulant le comportement des fragments. L'objectif premier est de dissocier de manière contrôlée les contributions du solide, du gaz et de la mésostructure granulaire - notamment la taille et la forme des particules monodisperses - sur le transfert thermique. Cette démarche vise ensuite à alimenter des simulations permettant de relier les caractéristiques mésostructurales à la conductivité thermique effective de poudres d'oxyde. Les mesures sont réalisées à température ambiante à l'aide d'un dispositif plan chaud stationnaire développé à l'IUSTI, sous différentes atmosphères gazeuses (air et hélium). Les résultats mettent en évidence une forte dépendance de la conductivité thermique à la pression, à la nature du gaz et à la morphologie des particules. Le protocole expérimental mis en œuvre permet de quantifier séparément les effets du solide, du gaz et de la mésostructure granulaire, contribuant à une meilleure compréhension des mécanismes de conduction dans ces milieux fragmentés et à la robustesse des modélisations.

Caractérisation de la contamination cationique dans les membranes échangeuses de protons par spectroscopie infrarouge.

Alejandro Mateos Canseco^{1,*}, Linlin Liu, Tommaso Capurso, Chunghyuk Lee, Michael Deligant, Stéphane Chevalier²

* ✉ : alejandro.mateos-canseco@u-bordeaux.fr

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

² Arts et Métiers, ENSAM, Paris, France

Mots clés :

Résumé :

Avec une consommation énergétique mondiale qui augmente, la transition énergétique vers des systèmes durables, respectueux de l'environnement et propres constitue un défi majeur pour faire face aux enjeux climatiques et à la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur, ainsi qu'un élément clé pour le stockage et la conversion de l'énergie. Durant la dernière décennie, une plus grande attention a été portée aux électrolyseurs à membranes échangeuses de protons en raison de leur capacité à produire de grandes quantités d'hydrogène. Au cœur de ces technologies, la membrane (PEM en anglais) joue un rôle déterminant en assurant à la fois la conduction des protons, la séparation des gaz réactifs et l'isolation électrique. Sa performance conditionne directement l'efficacité, la durabilité et la sécurité de ces systèmes. La caractérisation des PEM est donc cruciale pour la compréhension du fonctionnement et le développement de nouveaux électrolyseurs optimisés. Un des facteurs clé pour estimer leurs performances est l'empoisonnement de la PEM par des cations (e.g., Cobalt et Cesium), durant leur fonctionnement. Celles-ci sont facilement contaminées par les produits de la corrosion des composants métalliques et par les impuretés présentes dans les réactifs. Ces contaminants cationiques peuvent entraîner une diminution de l'absorption d'eau par la PEM et, par conséquent, une réduction de sa conductivité protonique. Malgré l'importance des contaminants cationiques, leur effet sur l'absorption d'eau des PEM reste mal compris. Dans ce travail, une puce microfluidique a été développée afin de mesurer la diffusion des cations à travers une PEM et d'étudier comment cette contamination affecte leur teneur en eau. Une méthode d'imagerie spectroscopique en transmission dans le domaine infrarouge (IR) a été utilisée pour suivre les variations d'absorbance de la PEM au cours du processus de diffusion. Ces variations d'absorbance peuvent être corrélées à la fois à la teneur en eau et à la concentration en cations. Ce travail préliminaire ouvre la perspective sur la possibilité de déterminer le coefficient de diffusivité dans la PEM en fonction de la teneur en eau à chaque instant, en utilisant des méthodes inverses et le modèle de Fick pour calculer le transport de l'eau et des cations dans la PEM.

Comportement hygro-thermique des isolants bio-sourcés : de la métrologie sans effets de bord aux effets de porosité, d'orientation de fibres et d'humidité

Karen Mourda^{1,*}, Philippe Coussot

* ✉ : karen.mourda@univ-eiffel.fr

¹ Université Gustave Eiffel

Mots clés : Conductivité thermique des milieux poreux, Réseaux fibreux, Porosité et anisotropie structurale, Modèles hygro-thermiques prédictifs

Résumé :

Les isolants biosourcés présentent une grande diversité de structures et de procédés, ce qui entraîne une forte dispersion des conductivités publiées et limite la compréhension de leurs propriétés thermiques. Ce travail propose une analyse systématique des mécanismes gouvernant la conductivité de réseaux fibreux poreux, en s'appuyant sur des matériaux modèles en cellulose ainsi que sur des fibres réelles (chanvre, kératine). Dans un premier volet, nous réévaluons la méthode par fluxmètre HFM et montrons que les pertes latérales peuvent fortement biaiser les mesures sur matériaux très isolants. L'analyse conjointe des flux bruts, de la calibration NIST 1450E et de simulations numériques met en évidence l'importance de l'épaisseur, de la température moyenne et de l'anisotropie interne. En utilisant des échantillons minces (0,5-1 cm), il est possible d'éliminer la plupart des effets de bord et d'obtenir la conductivité réelle du matériau. Le second volet étudie l'influence de la porosité et de l'orientation des fibres. Des réseaux comprimés de cellulose ($\epsilon \approx 0,4-0,94$) montrent deux branches distinctes : une configuration axiale à conductivité faible, et une configuration perpendiculaire jusqu'à trois fois plus conductrice. Un modèle géométrique de compression, combiné à un modèle de connectivité inter-phase, relie ces évolutions à l'alignement progressif des fibres et permet d'estimer une conductivité intrinsèque du solide d'environ $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. L'application du même cadre au chanvre et aux fibres de kératine confirme que porosité et orientation constituent les déterminants majeurs des isolants fibreux. Le troisième volet analyse l'effet de l'humidité. À partir d'échantillons secs et saturés, puis suivis durant le séchage, nous montrons que l'eau liée modifie la conductivité principalement via la restructuration de la partition solide/air. En définissant une porosité réellement dépendante de l'humidité, les trajectoires λ - ϵ des échantillons s'alignent sur une loi maître, et l'évolution de λ peut être prédite par une interpolation simple entre les états sec et saturé. L'effet hygrométrique est fort en configuration axiale mais quasi nul en configuration perpendiculaire. En réunissant ces trois approches, ce travail établit un cadre unifié reliant porosité, orientation et humidité à la conductivité thermique, et répond directement au manque d'études structure-propriété identifiées dans la littérature. Il fournit enfin des bases qui ouvrent la voie au développement de modèles hygro-thermiques prédictifs pour la conception et l'optimisation de matériaux isolants de nouvelle génération, mieux maîtrisés et mieux adaptés aux enjeux de la transition énergétique.

Étude de stockage de la chaleur fatale issue de procédés industriels à hautes températures en lit fluidisé

Quentin Gueux^{1,*}, Olivier Farges¹, Abdelhamid Kheiri¹, Vincent Schick¹

* ✉ : quentin.gueux@univ-lorraine.fr

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

Mots clés : Chaleur fatale, Stockage de chaleur, Lit fluidisé, Transfert thermique, Procédés industriels

Résumé :

L'augmentation continue des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère impose le développement de solutions technologiques durables visant à améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels pour réduire les émissions. Dans ce contexte, ces travaux portent sur la valorisation de la chaleur fatale produite par des installations fonctionnant à hautes températures, en particulier via des systèmes de récupération et de stockage thermique. L'étude présentée ici s'intéresse plus spécifiquement aux mécanismes de transfert thermique entre les unités de captation à mousse poreuse et le stockage à lit fluidisé. Le premier objectif de ce travail est d'évaluer les performances globales du système au travers de deux paramètres principaux : (i) la quantité d'énergie stockée sur une durée donnée, et (ii) la température atteinte au sein du module de stockage. Le second objectif est le développement de modèles réduits afin de permettre le pilotage en temps réel du système énergétique. Pour réaliser cette étude un banc expérimental dédié à l'étude du stockage thermique sur des lits fluidisés a été développé au sein du LEMTA. Il est capable de fournir un flux d'air chauffé à plus de 200 degC avec un débit de 48 m³/h (800 L/min), permettant ainsi de caractériser les phénomènes de transfert et l'accumulation thermique au sein du sable. Pour compléter l'étude nous disposons d'une seconde installation expérimentale qui intègre un échangeur de chaleur poreux basé sur des mousses métalliques à cellules de Kelvin. Ce dispositif vise à étudier le captage de la chaleur à haute température en prenant en compte les interactions couplées entre conduction, convection et rayonnement. Comparés aux échangeurs de géométrie traditionnelle, ces échangeurs poreux présentent un potentiel d'amélioration significatif des performances thermiques, ouvrant la voie à des systèmes plus compacts et mieux adaptés aux contraintes industrielles.

Étude expérimentale du transfert de chaleur par changement de phase dans un milieu poreux avec une configuration à ménisque inverse

Mathilde Bois^{1,*}, Bénédicte Champel, Mathieu Mariotto, Michel Gradeck²

* ✉ : mathilde.bois@cea.fr

¹ CEA Grenoble

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

Mots clés : Caloduc, évaporation, changement de phase, milieu poreux, flux critique

Résumé :

Les caloducs sont des dispositifs de transfert thermique très performants dont le fonctionnement repose sur le changement de phase d'un fluide circulant dans une enceinte fermée. Ils sont largement utilisés dans les satellites de télécommunication afin d'assurer le contrôle thermique des équipements embarqués. Le caloduc étudié dans ce travail se distingue par une géométrie et un procédé de fabrication innovants visant à repousser les limites de fonctionnement (capillaire et d'ébullition) des caloducs conventionnels. À l'évaporateur, une structure capillaire de type « ménisque inversé » est mise en œuvre. Un banc expérimental a été conçu et dimensionné afin d'étudier les phénomènes d'écoulement diphasique et les transferts thermiques avec changement de phase dans un évaporateur à « ménisque inversé ». L'étude vise à observer la formation et la propagation de poches de vapeur sous différents flux thermiques appliqués avec de l'eau déionisée comme fluide de travail en première approche. Les observations sont réalisées à l'aide d'une caméra rapide et par thermographie infrarouge, tandis que les mesures de température sont obtenues à l'aide de thermocouples. Ces mesures permettent de déterminer le coefficient de transfert thermique de l'évaporateur. L'influence des propriétés du poreux (notamment la taille de pores, entre 6 et 600 μm), et des paramètres géométriques, tels que le nombre (3, 4 et 5), la largeur (0.5 à 2 mm) et la hauteur (1 à 3 mm) des piliers, est étudiée à travers une analyse comparative des différentes configurations testées. L'objectif est d'identifier les géométries optimales permettant de retarder l'apparition et la propagation de la vapeur afin d'améliorer les performances thermiques, notamment en termes de coefficient d'échange thermique et de flux critique. Ce travail contribue à une meilleure compréhension des mécanismes d'évaporation dans les milieux poreux et à l'extension des limites d'ébullition des caloducs.

Heat and Mass Transfer in a Capillary Porous Structure Infiltrated with Liquid Metal

Tien Dung Le^{1,*}, Arlindo Theodoro¹, Sébastien Leclerc¹, Jean-Christophe Perrin¹, Alexandre Labergue¹, Michel Gradeck¹, Jérôme Mortiz¹, Alan Durif², Paul Lohmuller³, Matthieu Spinosi³

* ✉ : tien-dung.le@univ-lorraine.fr

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

² CEA Cadarache, IRESNE/DER/SESI

³ Institut Jean Lamour

Mots clés : Capillary Porous Structure infiltrated by liquid Tin, Heat and mass transfer, Divertor, Fusion reactor

Résumé :

This work aims to investigate heat and mass transfer in a capillary porous structure (CPS) infiltrated with liquid metal, intended for use in next-generation fusion-reactor divertors. These components rely on 3D-printed porous metallic lattices infiltrated with liquid tin (Sn), with the objective of enhancing thermal management and extending the lifetime of these critical plasma-facing elements through capillary transport and self-healing mechanisms. CPS-based divertors infiltrated with liquid tin are expected to exhibit improved heat-dissipation capacity, increased durability, and reduced maintenance requirements compared with conventional solid divertors. The combination of controlled-pore-size lattices and liquid-tin infiltration offers superior thermal-management performance, enabling more uniform temperature distributions and enhancing resilience to extreme heat fluxes ranging from MW to GW/m². The complex heat- and mass-transfer phenomena within the liquid-tin-infiltrated porous lattice are modeled using a direct numerical simulation approach. This is based on the coupling between the phase-field model and heat transfer in porous structures, taking into account the evaporation effect. Experimentally, the capillary rise of liquid in the CPS, coupled with liquid evaporation, is investigated using MRI techniques. These experiments provide deeper insight into mass-transfer mechanisms within the CPS and support the validation of the numerical model.

Thème 14

Transferts thermiques à l'échelle micro et nanométrique

Ébullition convective du CO dans un micro-canal : Prédiction des performances thermiques par apprentissage automatique	154
---	-----

Ébullition convective du CO dans un micro-canal : Prédiction des performances thermiques par apprentissage automatique

Ahmadou Tidiane Diaby^{1,*}, Issa Jaffal¹, Marie-Christine Duluc¹, Pascal Tobaly¹

* ✉ : ahmadou-tidiane.diaby@lecnam.net

¹ Lafset, Cnam

Mots clés : Ébullition convective, Dioxyde de carbone, Micro-canal, Coefficient d'échange, Pertes de charge, Réseau de neurones

Résumé :

Cette étude porte sur le transfert de chaleur par ébullition du CO₂. Le fluide s'écoule dans un tube cylindrique de diamètre 0,7 mm. Le tube est chauffé à flux imposé. Les essais ont été réalisés pour trois températures de saturation (-10, -5 et 0 °C), pour des flux massiques compris entre 300 et 900 kg.m⁻².s⁻¹ et des densités de flux de chaleur variant de 5 à 20 kW.m⁻². Le titre en vapeur avant chauffage varie de 0 à 1. Deux modèles de réseaux de neurones ont été développés pour prédire le coefficient d'échange thermique (R² = 0,934) et le gradient de pression (R² = 0,989) à partir des quatre paramètres précédents. L'analyse de l'importance des variables et des courbes de dépendance partielle révèle que le flux massique est le paramètre le plus influent tant pour le coefficient d'échange que pour les pertes de charge.

Thème 15

Énergétique et optimisation des systèmes

Développement d'un prototype de refroidissement de composants électroniques à haute densité de flux par immersion diphasique	156
Effet Joule in situ pour la régénération thermique des MOFs : étude du graphite et du composite MOF/graphite à basse tension (type PV)	157
Impact de différentes stratégies de contrôle d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé sur la consommation énergétique de ces espaces	158
Optimizing the carbon footprint of an offshore upstream asset by maximizing its energy efficiency : An integrated exergetic modeling approach	159
Adaptive fault detection in solar thermal for industrial processes based on conditional quantile regression	160
Caractérisation expérimentale de stratégies passives de démarrage à froid de piles à combustibles de type PEM.	161
Étude numérique et expérimentale des performances d'un séchoir solaire low-tech	162
Optimisation méta-heuristique en temps réel de la prévention de la surchauffe dans une centrale solaire thermique à capteurs plans	163
Performances de l'unique installation solaire thermodynamique française : la centrale de 10 MWe ELLO	164

Développement d'un prototype de refroidissement de composants électroniques à haute densité de flux par immersion diphasique

Oumaima El Hassine^{1,*}, Thibaut Colinart, Pascal Le Bideau¹, Hervé Noël

* ✉ : oumaima.el-hassine@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud, CNRS, IRDL, UMR 6027, Lorient, France

Mots clés : Refroidissement par immersion diphasique, fluide diélectrique, data center, changement de phase.

Résumé :

Avec le développement des processeurs (CPU) et des cartes graphiques (GPU) plus performants pour répondre à l'essor de l'intelligence artificielle et à l'augmentation continue des besoins en calcul, la densité énergétique des data centers croît fortement. Cette évolution entraîne une hausse du TDP (Thermal Design Power) des composants, rendant les systèmes de refroidissement classiques, par air ou par eau, de moins en moins adaptés. Dans ce contexte, le refroidissement par immersion diphasique apparaît comme une solution performante pour dissiper des puissances thermiques élevées tout en améliorant l'efficacité énergétique. Dans cette étude, un prototype expérimental de refroidissement diphasique a été développé en sélectionnant et en intégrant des composants clés d'un système de refroidissement par immersion diphasique. Il comprend une cuve de 30 L remplie d'un fluide diélectrique dans lequel sont immergées deux résistances chauffantes en céramique délivrant plus de 2 kW et pilotées par un contrôleur de puissance, simulant la charge thermique d'un serveur à haute densité. Un condenseur optimisé, associé à une conception favorisant l'élimination des gaz non condensables, maximise les échanges thermiques pour la condensation des vapeurs. Le système intègre également une gestion automatique de la pression par pilotage d'électrovannes, afin de prévenir toute surpression ou sous-pression. Des thermocouples positionnés en différents points du prototype ainsi qu'un débitmètre placé en amont du condenseur permettent d'évaluer les performances thermiques du système. L'instrumentation est complétée par deux capteurs de pression. Un protocole expérimental a été élaboré et différents essais ont été réalisés à différentes puissances. Les premiers résultats ont confirmé la faisabilité du concept et démontré la capacité du système à fonctionner efficacement en cycle fermé. Ces résultats offrent des perspectives prometteuses d'optimisation des systèmes de refroidissement par immersion diphasique adaptés aux serveurs haute performance des futures infrastructures.

Effet Joule in situ pour la régénération thermique des MOFs : étude du graphite et du composite MOF/graphite à basse tension (type PV)

Moussa Hamieh^{1,*}, Bakri Abdulhay, Elissa El Rassy, Xavier Py¹, Georgio Chreim, Thomas Devic, Solomon Gebremariam

* ✉ : moussa.hamieh@univ-nantes.fr

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de Thermique et énergie de Nantes

Mots clés : Capture du CO₂, Composite MOF/graphite, intensification conductivités thermique et électrique, TSA, Effet Joule

Résumé :

La quête de matériaux efficaces pour la capture du CO₂ consiste un enjeu majeur face aux défis environnementaux et énergétiques actuels. Les MOFs (Metal-Organic Framework), matériaux poreux émergents reconnus se distinguent par leurs capacités d'adsorption du CO₂, pouvant atteindre jusqu'à 60% de plus que celles des charbons actifs ou des zéolithes. Cependant, ces performances élevées s'accompagnent d'effets thermiques (adsorption exothermique, désorption endothermique) responsables d'une réduction pouvant atteindre 50% de leurs capacités d'adsorption. De plus, le procédé classique de régénération par Temperature Swing Adsorption (TSA) nécessite une énergie importante pour les températures de désorption du CO₂. Dans le cadre de l'ANR TEM-MOF, une approche innovante a été développée pour maîtriser les effets thermiques et réduire la demande énergétique de régénération : combiner les MOFs avec du graphite afin de former des composites conducteurs. Les MOFs à base d'acide gallique ont été synthétisés à l'Institut des Matériaux de Nantes - IMN, et les composites MOF/graphite (80% MOF, 15% graphite naturel expansé ENG, 5% liant PAA) ont été élaborés au Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes - LTEN. Le chauffage par effet Joule in situ a été testé sur des échantillons de graphite à différentes masses volumiques (52, 100 et 184 kg/m³) et pour plusieurs intensités de courant allant de 5 à 12,5 A. Les résultats montrent que la masse volumique du graphite influence l'anisotropie thermique et électrique du matériau : à faible masse volumique, le comportement est quasi isotrope, tandis qu'une densité élevée induit une anisotropie marquée. De plus, la masse volumique et le courant influencent significativement la montée en température, ainsi que la résistance électrique du matériau, qui diminue avec la température en raison de l'augmentation de sa conductivité électrique. Les essais sur le composite MOF/graphite initialement à température ambiante ont permis d'atteindre la température requise pour la désorption du CO₂ (~100degC), pendant environ 150 s sous une puissance moyenne de 20 W. Des tensions faibles de 2 V pour le graphite seul et 5 V pour le composite, démontrent la faisabilité d'un chauffage électrothermique à basse tension continue compatible avec des sources photovoltaïques, type PV. Ces résultats confirment la pertinence du chauffage par effet Joule in situ pour la régénération thermique des MOFs et ouvrent la voie à des systèmes de capture et de désorption du CO₂ plus efficaces et énergétiquement sobres. En effet, le graphite joue un double rôle : il agit comme un support mécanique pour le MOF (initialement en poudre) et permet la régénération électrothermique in situ grâce à sa conductivité électrique.

Impact de différentes stratégies de contrôle d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé sur la consommation énergétique de ces espaces

Emile Menguy^{1,*}, Stephane Gibout², Didier Haillot¹

* ✉ : emile.menguy.1@ens.etsmtl.ca

¹ École de technologie supérieure (ÉTS), Montréal, QC, Canada

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

Mots clés : agriculture en environnement contrôlé, contrôle

Résumé :

Afin de répondre aux enjeux de souveraineté alimentaire, les espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC) se développent fortement au Québec depuis quelques années. Il existe plusieurs types d'espaces différents regroupés en deux catégories : les serres et les espaces de production végétale intérieure, comprenant notamment les fermes verticales et les fermes conteneurs. Bien qu'ils puissent avoir des dimensions, des équipements et des cultures variés, ces espaces AEC ont pour objectif de produire le maximum de végétaux. Pour cela ils doivent répondre à un cahier des charges bien précis en termes d'éclairage, de température et d'humidité relative. Le respect de ces exigences engendre une consommation d'énergie importante. Il est donc nécessaire de réfléchir à des stratégies de contrôle permettant d'optimiser les conditions climatiques intérieures tout en limitant la consommation énergétique. Pour cela, il existe de nombreuses stratégies de contrôle. Il est cependant difficile de trouver une documentation regroupant ces stratégies. Le but de ce travail est donc de réaliser une revue de littérature afin de documenter les différentes stratégies de contrôle existantes adaptées aux différents espaces AEC et de déterminer leurs avantages et leurs limites

Optimizing the carbon footprint of an offshore upstream asset by maximizing its energy efficiency : An integrated exergetic modeling approach

Nathan Senechau^{1,*}, Maxime Higelin, Sabine Sochard, Sylvain Serra¹, Jean-Michel Reneaume¹

* ✉ : nathan.senechau@univ-pau.fr

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

Mots clés : énergie, exergie, irréversibilités, hydrocarbures, empreinte carbone, offshore

Résumé :

Le contexte climatique actuel requiert une décarbonation massive des actifs de production d'hydrocarbures. L'objectif de cette étude consiste à élaborer une méthodologie avancée pour l'évaluation quantitative et l'optimisation de la performance énergétique et des émissions de gaz à effet de serre d'une installation amont offshore en exploitation. À l'aide d'un modèle exergetique dynamique implémenté en Python, cette approche permet de simuler à la fois la dynamique du réservoir en sous-sol et le comportement des procédés en surface. Son architecture flexible prend en charge un large éventail d'interfaces et de solveurs d'optimisation. Le modèle intègre le logiciel GAP de Petex pour la modélisation des écoulements en sous-sol et la gestion du réservoir, ainsi que le logiciel BEST, propriété de TotalEnergies, adapté à la simulation des procédés en surface permettant ainsi une analyse holistique du système. Un bilan exergetique est réalisé sur l'ensemble de la chaîne de production, et les résultats du modèle sont comparés aux données historiques de production du site pour validation. Les résultats de l'étude initiale révèlent que les unités de traitement en surface, en particulier les turbines à gaz utilisées pour la réinjection de gaz lift, sont responsables de plus de 70 % de la destruction totale d'exergie. Ces zones inefficaces énergétiquement sont prioritaires par rapport aux réductions des émissions de carbone. Les variables des procédés de surface identifiées pour l'optimisation incluent la pression de séparation des hydrocarbures du premier séparateur de surface, la configuration du train de recompression du gaz et la répartition de la charge des turbines, chacune influençant de manière significative l'intensité de l'empreinte carbone du site sous contraintes opérationnelles. Les tests d'optimisation préliminaires démontrent une corrélation directe entre la minimisation des irréversibilités de procédé et les émissions de GES. Ainsi, le modèle proposé permet de prédire les interdépendances liées à l'interaction entre la surface et la subsurface afin d'optimiser l'intégration des différents éléments de l'installation industrielle tout au long de son cycle de vie, visant à une meilleure utilisation de l'énergie et à la réduction significative de son impact environnemental.

Adaptive fault detection in solar thermal for industrial processes based on conditional quantile regression

Phuong Thao Nguyen Nguyen^{1,2,*}, Xavier Le-Pivert¹, Stéphane Grieu², Valéry Vuillerme¹

* ✉ : phuong-thaonguyen.nguyen@cea.fr

¹ CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

² CNRS-PROMES (UPR 8521), Technosud-Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66100 Perpignan

Mots clés : Solar thermal system, adaptive fault detection, conditional quantile regression, opacification, industrial processes

Résumé :

Solar thermal systems are increasingly used in industrial processes, making early and accurate fault detection essential for efficient system operation. One of the most common faults in such systems is the opacification of solar collectors, which limits solar transmission and thus reduces thermal performance. However, detecting this fault remains challenging due to the scarcity of labelled fault data. To address this problem, this study proposes an adaptive fault detection method to detect abnormalities without requiring labelled fault data. The proposed method, formulated as a statistical deviation problem, uses conditional quantile regression to automatically learn adaptive thresholds from historical normal operations, which are then applied to detect abnormal deviations in subsequent operations. The data used are based solely on a physics-based simulation model of a solar thermal plant for dairy production. Healthy data were obtained by simulating under normal operating conditions, while faulty data were generated by injecting faults (sudden or gradual, and of different intensities) into the model. The results indicate that the proposed method effectively detects faults, alarming about 80-90% of faulty patterns, of which 90-96% are the highest severity level (e.g. opacification levels around 30%). For faults that appear gradually, the detection performance remains consistent with the limited deviation from nominal system behaviour, reflecting the inherent difficulty of early-stage fault detection. Besides, the proposed method maintains a low false alarm rate of less than 5% under normal operating conditions. To enhance stability, a rule-based time validation layer is introduced, relying on the frequency and persistence of daily detections to minimize false alarms. These findings suggest that the proposed method is a promising approach for detecting faults in solar thermal systems for industrial processes. As future work, the method could serve as the first layer in a multi-layer fault detection framework that combines physics-informed and artificial intelligence-based approaches.

Caractérisation expérimentale de stratégies passives de démarrage à froid de piles à combustibles de type PEM.

Sylvie Begot^{1,*}, Mortada El Ahmadi¹, Mariyem Boutamina¹, Fabien Harel², Guillaume Layes¹, Valérie Lepiller¹

* ✉ : sylvie.begot@umlp.fr

¹ Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

² Université Gustave Eiffel

Mots clés : piles à combustible, gestion thermique, écoulement alterné

Résumé :

Caractérisation expérimentale de stratégies passives de démarrage à froid de piles à combustibles de type PEM. Le démarrage à froid en température négative sans apport d'énergie extérieure reste un défi pour les piles à membrane à échange de protons (PEMFC). Cette étude évalue expérimentalement une nouvelle stratégie de chauffage passif utilisant un écoulement alterné de liquide de refroidissement pour améliorer la gestion thermique. L'objectif est d'atteindre le plus rapidement possible une température positive dans l'empilement, tout en maintenant une homogénéité de température la plus élevée possible. Les expériences sont menées avec une pile ZSW à 5 cellules de 100 cm² de surface active. La température de démarrage est de -5°C et -10°C. La méthode proposée repose sur un fonctionnement en écoulement alterné où le débit de liquide caloporteur s'inverse périodiquement. Des phases d'arrêt de circulation de liquide caloporteur sont également incluses. Les différents essais sont analysés par des métriques thermiques clés, incluant la montée de température, l'uniformité verticale et horizontale, et des métriques électriques de tension cellules. Les résultats montrent que les stratégies passives avec un écoulement alterné permettent à la fois démarrage rapide et une bonne homogénéité des températures dans l'empilement. Elles peuvent donc être considérées soit seules soit en complément d'une stratégie de chauffage actif pour améliorer le démarrage en température négative des piles à combustible.

Étude numérique et expérimentale des performances d'un séchoir solaire low-tech

Sylvain Serra^{1,*}, Thomas Taxil¹, Benjamin Chane Meng Hime¹

* ✉ : sylvain.serra@univ-pau.fr

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

Mots clés : séchoir solaire, low-tech, CFD, expérimentation, convection naturelle, modélisation numérique

Résumé :

Ce projet s'inscrit dans une démarche low-tech, il porte sur l'étude d'un séchoir solaire indirect conçu pour préserver les propriétés nutritives des aliments tout en utilisant des composants simples, accessibles et reproductibles artisanalement. L'objectif est de proposer une solution durable, peu coûteuse et adaptable, ne nécessitant ni outils industriels complexes ni compétences techniques avancées. Approche Numérique : La première partie de l'étude consiste en une modélisation numérique des phénomènes de transport au sein du séchoir. L'enjeu principal est de représenter fidèlement la convection naturelle, sans recourir à des vitesses imposées en condition aux limites, afin de refléter au mieux les conditions réelles de fonctionnement. Cette modélisation, réalisée avec le logiciel Ansys Fluent, permet de caractériser les performances théoriques du dispositif et de les comparer aux résultats expérimentaux. Approche Expérimentale : Une campagne expérimentale est menée sur un prototype de séchoir conçu à l'ENSGTI. Les mesures de performance sont basées sur : • L'utilisation d'un pyranomètre, d'un anémomètre et de thermocouples pour valider les résultats numériques. • L'évaluation du taux de séchage, basée sur des mesures de masse du produit avant et après séchage. Ces données expérimentales permettent non seulement de valider la modélisation numérique, mais aussi d'évaluer l'efficacité réelle du séchoir dans des conditions d'utilisation concrètes. Cette étude combine donc une double approche numérique, pour une compréhension fine des mécanismes et expérimentale, pour une validation pratique et une évaluation des performances en situation réelle. L'objectif final est de démontrer la fiabilité et l'efficacité d'un dispositif low-tech, tout en offrant des pistes pour son amélioration et son déploiement à plus grande échelle.

Optimisation méta-heuristique en temps réel de la prévention de la surchauffe dans une centrale solaire thermique à capteurs plans

Capucine Lasserre,^{*} Valéry Vuillerme¹

^{*} ✉ : capucine.lasserre@cea.fr

¹ CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

Mots clés : Solaire thermique pour l'industrie, Optimisation dynamique en temps réel, pilotage avancé,

Résumé :

LACTOSOL (Verdun, Meuse) est une centrale solaire thermique à capteurs plans conçue et opérée par NEWHEAT. Elle participe à la décarbonation d'un procédé industriel grâce à la fourniture de chaleur solaire ($< 100^{\circ}\text{C}$). Ses performances peuvent être améliorées par un pilotage optimal. Toutefois, la variabilité de la ressource et de la consommation industrielle impose une adaptation constante des variables de contrôle. De plus, lorsque les conditions sont peu favorables (faible consommation et/ou fort ensoleillement), elle présente un risque de surchauffe pouvant entraîner sa mise en défaut. Un aérotherme est présent à la sortie du champ solaire pour en réguler la température moyennant une consommation électrique importante. Le travail suivant vise à optimiser en temps réel la stratégie de prévention de la surchauffe de cette centrale grâce à un algorithme génétique. Le refroidissement doit être minimal afin de ne pas pénaliser la rentabilité de la centrale, mais suffisant pour assurer la sécurité des opérations incluant des erreurs de prévision. L'aérotherme peut être opéré suivant trois modes de fonctionnement qui sont représentés par des variables binaires constituant les degrés de liberté du problème d'optimisation. L'algorithme génétique est développé à partir de la bibliothèque Python DEAP afin de maximiser le gain économique lié à la revente de chaleur. Un total de 10 générations, initialisée à partir de résultats préliminaires, comportant 64 chromosomes chacune, est évalué toutes les 48h. L'optimisation est mise à jour toutes les 24h, grâce au principe de l'horizon roulant, par une évaluation du chromosome le plus performant sur un modèle de simulation fin (Dymola). L'utilisation d'un modèle réduit est envisagée afin de réduire le temps de calcul. Par rapport au pilotage par règles expertes, une augmentation de plus de 9% du profit et une diminution de 8% (20 MWh) des pertes sont observées sur une période de huit jours (du 5/08/25 au 13/08/25).

Performances de l'unique installation solaire thermodynamique française : la centrale de 10 MWe ELLO

Valentine Grange^{1,*}, Sylvain Rodat¹, Quentin Falcoz¹, Valéry Vuillerme², Fabien Roget

* ✉ : valentine.grange@promes.cnrs.fr

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

² CEA Grenoble, DRT/LITEN/DTCH, Université Grenoble Alpes

Mots clés : centrales solaires à concentration, réflecteurs de Fresnel linéaires, génération directe de vapeur, données opérationnelles réelles

Résumé :

Les centrales solaires à concentration à réflecteurs de Fresnel linéaires en génération directe de vapeur sont reconnues pour leur capacité à produire une énergie renouvelable pilotable, adaptée aux besoins en chaleur de l'industrie. Cependant, le manque de données opérationnelles réelles limite la précision et la validation des modèles numériques et l'optimisation de ces systèmes. Ce travail comble cette lacune en analysant les performances de la centrale ELLO (10 MWe), située à Llo (Pyrénées-Orientales, France), à partir de données collectées en 2025 sur 338 jours d'exploitation valides. La centrale ELLO, opérationnelle depuis 2019, comprend un champ solaire de 27 lignes de miroirs (152 796 m²) et un système de stockage thermique composé de neuf accumulateurs de vapeur (120 m³ chacun), offrant une capacité de 4 heures de production à pleine charge. Le fluide caloporteur (eau/vapeur) permet de générer de la vapeur surchauffée à 286 °C et 70 bars, alimentant une turbine de 10 MWe avec aéro-condenseur. Les données proviennent de plus de 200 capteurs repartis dans toute la centrale, avec des moyennes horaires pour les données annuelles et des relevés toutes les 10 secondes pour les données journalières. L'analyse temporelle des puissances journalières révèle un pic de production électrique vers midi, avec un stockage de la vapeur excédentaire produite dans l'après-midi, pour une restitution progressive après le coucher du soleil, illustrant l'efficacité du système de stockage par accumulateur de vapeur dans la gestion de l'intermittence de la ressource solaire. L'étude annuelle met en évidence des variations saisonnières significatives, avec des performances optimales en été et une baisse en hiver, liée à l'ensoleillement et aux températures extérieures. Le rendement global de la centrale, défini comme le rapport entre l'énergie électrique nette produite et l'énergie solaire incidente, atteint son maximum au mois de juin avec un rendement moyen de 6.79%, contre 2.11% en janvier. Les données permettent également d'évaluer les rendements en charge partielle et l'utilisation du stockage thermique, fournissant des indications précieuses pour l'optimisation des composants et des stratégies de contrôle. Cette analyse, basée sur des données opérationnelles uniques, offre une référence concrète pour la conception, la modélisation et l'optimisation des centrales Fresnel en génération directe de vapeur. Sur la base de ces données, un modèle dynamique global de l'installation sera développé et validé afin de fournir un outil adapté pour l'optimisation de la fourniture de chaleur industrielle décarbonée.

Liste des auteurs

A

Aatik, Manal	111
Abadassi, Frédy	30
Abderezak, Aouali	48
Abdulhay, Bakri	157
Abou Akroush, Mohammad	88
Aboulfalah, Houda	61
Adjizi, Abderraouf	75
Aguilera-Cortes, Israel	79
Aridi, Mona	24
Aridi, Rima	24
Arnoult, Christophe	23
Asllanaj, Fatmir	125
Augé, Antoni	134
Avetikovi, Nino	12, 13

B

Bahrani, S.Amir	138
Bailly, Yannick	36
Barriere, Thierry	36
Barthes, Magali	78
Basnet, Sarad	106
Bataille, Françoise	64, 124
Bati, Mégane	134
Battaglia, Jean-Luc	12, 13
Baucour, Philippe	55
Baudin, Nicolas	93
Bazgaou, Abderrahim	122
Beaini, Rodrigue	101
Begot, Sylvie	161
Beji, Ranim	16
Bellettre, Jérôme	93
Benabid, Rafik	91
Benabou, Abdelkader	48
Benahmed, Aziz	122
Ben Amar, Mounir	72
Bentivegni, Marcello	8
Bentivoglio, Fabrice	110
Berger, Julien	44
Bermeo Varon, Leonardo Antonio	40
Bernachy-Barbe, Fabien	146
Beysens, Daniel	127

Biéron, Marianne	18
Blet, Nicolas	9, 61, 63
Boileau, Thierry	65
Bois, Mathilde	150
Bompas, Jérémy	98
Bossu, Julie	114
Bouard, Julien	119
Boubanga Tombet, Stéphane	101
Bouccena, Imane	138
Boulet, Pascal	74
Bouraqadi, Noury	135
Bourdon, Pierre	59
Bourges, Coline	44, 45, 129, 131
Boutamina, Mariyem	161
Bouvier, Pascale	135
Bouzouidja, Ryad	60, 114
Bracq, Jean-Baptiste	93
Bruch, Arnaud	110
Burgers, Ida	12, 13
Bédécarrats, Jean-Pierre	105

C

Caballina, Ophélie	49, 82, 133
Cadiou, Stephen	131
Capurso, Tommaso	147
Carin, Muriel	131
Caron, Simon	20
Castanet, Guillaume	33, 82, 85, 133
Castelain, Cathy	88
Celle, Pierre	4
Chadil, Amine	75
Chalet, David	92
Champel, Bénédicte	150
Chane Meng Hime, Benjamin	162
Chaouki, Jamal	75
Chaput, Laurent	69
Charpantier, Baptiste	23
Cheng, Christophe	86
Cherry, Léa	124
Chetehouna, Khaled	80
Chevalier, Stéphane	47, 147
Chreim, Georgio	157

Cloet, David	142
Colinart, Thibaut	108, 156
Collignon, Romain	96
Collin, Anthony	99, 128
Contassot-Vivier, Sylvain	125
Cornec, Tangui	23
Coste, Frédéric	100
Cotta, Renato Machado	32
Coureau, Jean-Luc	114
Courtois, Elodie	45, 129
Courtois, Mickaël	45, 129, 131
Coussot, Philippe	143, 148
Coustet, Christophe	134
Cousteur, Fabrice	119
Couton, Dominique	31
Czerwicz, Thierry	133

D

Dal, Morgan	100
Daout, Cyril	57
Darmet, Natacha	42, 61, 63
Day, Arnaud	114
De Larochelambert, Thierry	36, 126
Deligant, Michael	147
Dellinger, Nicolas	59
Delmas, Jérôme	6
Dembele, Modibo	99
De Melo Antunes, Mariana	12, 13
De Paepe, Ward	98
Devic, Thomas	157
Diaby, Ahmadou Tidiane	154
Didier, Arnaud	142
Diez, Mathilde	41, 132
Djebbar, Nassira	27
Djermoune, Asma	84
Donjat, David	46
Douchin, Jérôme	131
Douillard, Clara	18
Dufour, Stéphane	94
Dulac, Antonin	142
Duluc, Marie-Christine	154
Dumain, Antoine	33
Dumont, Antoine	101, 116
Dumoulin, Jean	52
Duquesne, Marie	105
Durif, Alan	151

E

E.H. Bruno, Arthur	32
Ehret, Nathalie	41, 132, 146
El Ahmadi, Mortada	161
El Hafi, Mouna	115
El Hajal, Jean	5

El Hassine, Oumaima	156
Elias, Abdenour	27
Elmaakoul, Anas	61
Eloirdi, Saad	21
El Rassy, Elissa	109, 157
Escape, Christophe	23
Esmiol, Delphine	146
Euphrasie, Sébastien	78
Eymet, Vincent	134

F

Falcoz, Quentin	23, 164
Fan, Yilin	6, 111
Faraji, Mustapha	67
Farges, Olivier	74, 115, 119, 134, 136, 149
Fasquelle, Thomas	145
Fatnassi, Hicham	122
Fdida, Nicolas	89
Feldheim, Véronique	116
Fenot, Matthieu	31
Ferdjallah, Lydia	86
Fiard, Jean-Michel	65
Flamant, Gilles	124
Flores, Pedro	127
Fois, Magali	86
Fond, Benoît	89
Forest, Vincent	134
Fortunel, Jean-Pierre	94
François, Pierre	30
Fudym, Olivier	40
Fuentes, Adrien	108
Funfschilling, Denis	30

G

Gallienne, Nicolas	100
Gardarein, Jean-Laurent	41, 132, 146
Garnier, Bertrand	130
Gaspar, Jonathan	41, 132
Gaud, Nicolas	55
Gavignet, Eric	78
Gebremariam, Solomon	157
Geslain, Edouard	44, 51
Ghenaim, Abdellah	30
Giacometti, Gregory	41
Gibout, Stephane	107, 158
Giraud, Florine	33, 112, 142
Giron Ceballos, David	71
Glantz, Tony	66, 81
Godfrin, Lysie	107
Godin, Alexandre	105
Gradeck, Michel	66, 81, 84, 94, 150, 151
Grange, Valentine	164
Graur, Irina	144

Grieu, Stéphane	160
Grigorov, Emil	144
Grégoire, Benjamin	105
Guenadou, David	49
Gueux, Quentin	149
Guo, Mingming	69

H

Hachet, Dorian	8
Haddad, Oriana	72
Haeussler, Anita	124
Haillot, Didier	107, 158
Hamidouche, Souria	21
Hamieh, Abbas	78
Hamieh, Moussa	157
Hammen, Lucien	14
Haraketi, Amal	114
Harel, Fabien	161
Hassan, Fatima	48
Havet, Michel	58
Hermassi, Mohamed Amine	130
Higelin, Maxime	159
Hirsch, Sacha	89
Hoang, Hong-Minh	38
Hoang, Van Quan	93

I

Ibos, Laurent	50, 86
Iragi, Merveil	109
Irimiea, Cornelia	89
Ismail, Ali	36
Iung, Alexis	87

J

Jaffal, Issa	154
Jannot, Yves	42
Jeanningros, Xavier	31
Joly, Frédéric	43, 57
Jose, Doria Garcia	26
Joseph Charls, Chrisle	65

K

Kane, Mbaye	93
Kasraoui, Taissir	91
Keller, François-Xavier	56
Khaldi, Idir	128
Kharkwal, Himanshi	78
Kheiri, Abdelhamid	9, 65, 149
Koulali, Aimad	19
Kouzzi, Salma	118

L

Labat, Alexandre	64
Labgorre, Bernard	100

Labergue, Alexandre	49, 66, 81, 151
Lacassagne, Tom	138
Lachi, Mohammed	32
Lacroix, David	73
Lahlou, Fadi	115
Lamoot, Ludovic	80
Lanzetta, Francois	55, 78
Lara Cruz, José Luiz	60, 105
Largiller, Grégory	83
Lasserre, Capucine	163
Laurine, Cappon	76
La, Vu Hai	70
Lawniczak, Fabrice	30
Layes, Guillaume	161
Lazrak, Ossama	145
Le Bideau, Pascal	156
Le Bot, Cédric	60
Leclerc, Sébastien	95, 151
Lecoanet, Alexandre	84
Lecointe, Damien	111
Leducq, Denis	38
Lee, Chunghyuk	147
Lefavrais, Sylvain	127
Lefevre, Frédéric	96
Lefort, Stéphane	119
Legendre, Dominique	85
Le Masson, Philippe	44
Lemenand, Thierry	24
Le Mener, Maelenn	45, 129
Le Pierrès, Nolwenn	38, 112
Lepiller, Valérie	161
Le-Pivert, Xavier	160
Le Roux, Diane	108
Letessier, Jordan	47
Le, Tien Dung	151
Le Touz, Nicolas	52
Letzelter, Mathieu	124
Levy, Sarah	105
Libert, Deniz	131
Lin, Jian	16, 62
Li, Simon	83
Liu, Linlin	147
Lohmuller, Paul	151
Lontsi, Frédéric	109
Louart, Olivier	21
Lourd, Clément	49
Lucas, Franck	28
Lukau M'Nyampara, Judith	60
Luna Valencia, Juan Esteban	66, 81
Lybaert, Paul	116
López Linares, Juan	22

M

M'Hadbi, Amira	138
M. M. De Lima E Silva, Sandro	13
Magnenet, Vincent	62
Magueresse, Anthony	108
Maillet, Denis	139
Maire, Jérémie	47
Malandain, Mathias	52
Malik, Muhammad Yousaf	115
Mancaux, Jean-Marie	17, 25, 104
Manceau, Jean-Luc	52
Mangi, Fareed Hussain	137
Manhes, Julien	124
Marc, Olivier	28
Mariotto, Mathieu	150
Maris Da Silva Filho, Joao Marcelo	66
Marouf, Abderahmane	30
Marquis, Damien	99
Martin, Céline	41, 132
Masi, Enrica	75
Masse, Samuel	49
Mateos Canseco, Alejandro	147
Matteo, Laura	71
Mattos, Michelle	137
Mazen, Marie-Sara	105
Menguy, Emile	158
Mer, Samuel	64, 79
Messal, Oualid	48
Metivier, Christel	95
Michel, Benoît	70
Millot, Grégory	120
Monchau, Jean Pierre	50
Monet-Vidonne, Clément	41
Morin, Franck	71
Mortiz, Jérôme	151
Mougenot, Louis	55
Mourda, Karen	148
Mroueh, Katia	6
Mura, Ernesto	92
Muselli, Marc	127

N

Navizet, Isabelle	75
Ndoumou, Rémy	51
Ngo, Julien	23
Nguyen, Frederic	71
Nguyen, Phuong Thao Nguyen	160
Nguyen, Van Truong	143
Ni, Jianan	43
Nkenfack, Isibert	73
Noël, Hervé	108, 156
Nyffenegger-Péré, Yaniss	74, 134

O

Olivès, Régis	17, 104
Orlande, Helcio R. B.	40, 44
Ouaouja, Zakaria	58
Oueslati, Hatem	16
Ould El Moctar, Ahmed	130
Ouoba, Bazam Amonet	117
Ousegui, Abdellah	58
Ozel, Ali	75
Ozenne, Valery	12, 13

P

P. Naveira-Cotta, Carolina	32
Palmier, Aubin	31
Pannier, Marie-Lise	24
Papillon, Anthony	131
Pascale, Fabien	69, 125
Passarello, Jean-Philippe	72
Pedraza, Fernando	105
Peraltaventocilla, Sergiopetro	85
Pernot, Gilles	73
Perrier, Pierre	144
Perrin, Jean-Christophe	151
Perrin, Mickaël	36
Petit, Rodolphe	50
Petit, Sylvain	89
Pham, Van Kha	38
Phan, Hai Trieu	37, 38, 70
Picard, Florian	7
Pierre, Thomas	40, 44, 45, 50, 51, 129
Pilla, Guillaume	89
Pinheiro, Amandine	119, 136
Piquard, Louis	4, 134
Potaufoux, Thomas	82, 133
Py, Xavier	109, 157

Q

Quemener, Olivier	43
-------------------------	----

R

Rabeh, Reda	61
Rahma, Ahmed G.	30
Rakesh, Ramit	9
Rambure, Nicolas	5
Remy, Benjamin	9, 61, 63, 65
Reneaume, Jean-Michel	159
Renon, Clément	31
Reulet, Philippe	59
Revellin, Rémi	70
Rey, Frédéric	49
Ridlova, Martina	100
Rigollet, Fabrice	41, 145, 146
Rimbert, Nicolas	80, 84
Riou, Benjamin	115

Ristagno, Baptiste	14
Robert, Laurence	56
Robinet, Antonin	80
Rochais, Denis	57
Rodat, Sylvain	164
Rodriguez Sarmiento, Mercedes	22, 26
Roget, Fabien	164
Romulus, Estelle	132
Rongier, Clément	5
Rossignol, Fabrice	105
Rosso, Judy	83
Rouaud, Olivier	58
Rouizi, Yassine	43, 57
Roux, Stéphane	6
Roy, Jean-Claude	36
Royon, Laurent	127, 138
Royon, Léo	57
Rozenbaum, Olivier	134, 136
Rulliere, Romuald	96
Run, Keovathana	121
Russeil, Serge	19

S

Sanjivy, Kanhan	28
Sanson, Rémi	83
Santos, Mayara Gil Castro	40
Schatz, Philippe	94
Schick, Vincent	42, 149
Schildermans, Joppe	8
Sebillieu, Julien	85
Seif, Ahmed	94
Seiler, Nathalie	84
Sellami, Ilyas	80
Senechau, Nathan	159
Serra, Sylvain	106, 159, 162
Sesmat, Alexis	55
Sgreva, Nicolo	95
Shah, Aayush Jatin	74
Shah, Syed	78
Shahverdi, Ali	4
Sidi Boulouar, Rahima	143
Simo Tala, Jules Voguelin	87
Siroux, Monica	16, 62, 68, 117
Sobotka, Vincent	6
Sochard, Sabine	159
Sokore, Mohamed	63
Sommier, Alain	48
Somrani, Oumayma	90

Soto, Jérôme	109
Soto, Jérôme	109, 111
Spinosi, Matthieu	151
Stiti, Mehdi	85
Stutz, Benoit	33, 110, 142
Sy, Awa	110

T

Tadrist, Lounès	78, 90
Tajikghanbari, Tahmin	92
Tan, Qianwen	68
Taxil, Thomas	162
Tchiacheu Kadjo, Annick	14
Terfous, Abdelali	30
Terrei, Lucas	99, 128
Terrien, Thomas	110
Teulet, Philippe	131
Theodoro, Arlindo	151
Tobaly, Pascal	154
Topin, Frédéric	83, 144
Toublanc, Cyril	58
Toullier, Thibaud	52
Toutant, Adrien	64, 79
Touzouirt, Samy	100
Tu, Junhao	144

V

Valensi, Flavien	131
Vanson, Jean-Mathieu	146
Varé, Thomas	42
Veca, Morgane	46
Vecten, Simon	4
Verseux, Olivier	9
Vicente, Jérôme	145
Vieira Da Silva Oliveira, Arthur	66, 81
Vignon, Pierre	114
Vogt Wu, Tingting	114
Vuillerme, Valéry	20, 160, 163, 164

W

Wang, Bowen	125
Wirtz, Mathilde	37

Y

Yapi, Ignace	72
Yunus, Abdul-Gafar Adegoke	112

Z

Zeitoun, Wael	62
Zins, Sabine	142