



## RECUEIL DES RÉSUMÉS



Azureva Anglet



9h		<b>Ress. sol. &amp; sys. durables</b>	<b>Solaire à concentration</b>
10h30		pause <b>Stockage</b>	pause <b>Bâtiments &amp; villes solaires</b>
12h30	<i>Accueil</i> Déjeuner (buffet)	Déjeuner (buffet)	<i>Conclusion</i> Paniers repas
14h	<i>Introduction</i> <b>Conférence invitée</b> <b>Photoprocédés</b>	Session poster <b>Réseaux scientifiques</b>	<i>Départs</i>
16h30	Pause Présentations posters (120s)	Pause Session poster	
18h	Session poster		
19h	Cocktail		
20h	Dîner	Dîner	

Aide financière apportée  
par le CNRS via FédEsol



# Table des matières

<b>Programme des JNES2024</b>	<b>1</b>
Analyse de la Méthode de Mesure des Échanges Convectifs par Fluxmétrie: Application au Photovoltaïque, Baptiste Amiot [et al.] . . . . .	5
Un tournant pour le stockage d'énergie thermique : Exploitation du potentiel de LiOH malgré les défis initiaux., Fouzia Achchaq [et al.] . . . . .	7
Présentation du GT SFT " Thermique Atmosphérique " et focus sur des actions du LOA en lien avec FédEsol, Frédéric André [et al.] . . . . .	8
Gestion de l'intermittence d'un système de production et autoconsommation d'énergie via l'apprentissage par renforcement, Damien Bernarde [et al.] . . . . .	9
Energy Vector for Mobility and Building Needs, Ghada Ben Khalifa [et al.] . . . . .	11
Étude numérique de l'évaporation au sein d'une centrale photovoltaïque flottante, Baptiste Berlioux [et al.] . . . . .	12
Comparaison de la performance thermomécanique de géométries d'absorbeurs tubulaires pour centrales solaires à tour, Florian Bonzoms [et al.] . . . . .	14
Modèle thermoélectrique distribué d'un module PV: effet des conditions aux limites inhomogènes., Fadi Mehdi Bourarach [et al.] . . . . .	16
Résolution des transferts de chaleur par Monte-Carlo dans une géométrie urbaine lors d'une vague de chaleur, Cyril Caliot [et al.] . . . . .	18
Dynamic optimization models for optimal PV orientation using the heterogeneity of urban form, Farzaneh Changizi [et al.] . . . . .	19
Energy management system for optimal operation of a solar-driven district heating and cooling network near the Lac du Bourget in France, Malihe Davari [et al.] . . . . .	21

Panneaux solaires photovoltaïques-thermiques (PVT) pour seule source froide d'une pompe à chaleur, Valentin Delachaux [et al.] . . . . .	23
Recherche de solutions de rénovations énergétique à l'échelle d'une métropole : Étude numérique et in situ du confort thermique a l'échelle d'une métropole., Lucas Estay [et al.] . . . . .	25
Amélioration d'un système à réflecteur de Scheffler pour satisfaire les besoins de la cuisine solaire, Thomas Fasquelle [et al.] . . . . .	27
Empreinte environnementale de l'électricité solaire avec stockage pour le suivi de charge, Thomas Fasquelle [et al.] . . . . .	28
Optique FreeForm : un beamdown de 300 kW pour le Grand Four d'Odeillo, Emmanuel Guillot [et al.] . . . . .	30
Les installations solaires de PROMES-CNRS : la Grande Infrastructure de Recherche FR-SOLARIS, Emmanuel Guillot [et al.] . . . . .	32
La boulangerie solaire low-tech - Un exemple de solution socio-technique à la problématique énergétique, Guillaume Guimbretiere [et al.] . . . . .	35
Modélisation et optimisation thermodynamique du couplage entre un stockage thermique MCP et un moteur ERICSSON pour favoriser l'intégration des EnR sur le réseau électrique, Doha Kafeh [et al.] . . . . .	37
Vers une métallurgie solaire : réduction d'oxydes de fer par l'ammoniac et élaboration d'aciers sous flux lumineux concentré, Marion Luu [et al.] . . . . .	39
Influence du rayonnement solaire dans une rue canyon sur le confort thermique estival des occupants., Valentin Lahaye [et al.] . . . . .	41
Spatiotemporal variability of solar radiations within an urban context: a characterisation by means of Principal Component Analysis, Guillaume Le Gall [et al.] . . . . .	43
Modélisation dynamique et étude de sensibilité des dimensions d'un échangeur-stockeur thermique à base de matériaux à changement de phase, Diane Le Roux [et al.] . . . . .	45
Evaluation des prévisions météorologiques de rayonnement solaire pour la production d'énergie solaire, Marie-Adèle Magnaldo [et al.] . . . . .	47
REVÊTEMENTS À SÉLECTIVITÉ SPECTRALE POUR L'HYBRIDATION SOLAIRE PV/CST, Amine Mahammou [et al.] . . . . .	49

Analyse numérique du flux radiatif absorbé par un piéton dans une rue canyon en période de vague de chaleur, Hugo Matry [et al.] . . . . .	51
Modélisation du productible énergétique annuel de centrale solaire hybride PV-CSP, Zacharie Menard [et al.] . . . . .	52
Investigating the Thermal Behavior of Materials with Highly Reflective Polymeric Coatings under Solar Radiation: A Molecular Dynamics Simulation Approach, Hiba Mhiri [et al.] . . . . .	54
Conversion et stockage de l'énergie solaire via les réactions photochimiques et catalytiques, Toussaint Ntambwe Kambuyi [et al.] . . . . .	55
Evaluating World Urban Database, Access Portal Tools and Copernicus Global Land Service for Urban Meteorological Simulations: A Case Study in Lyon, Hamza Nisar [et al.] . . . . .	57
Solar Performance Indicators and Retrofitting of a Rural School in France, Mona Noroozi [et al.] . . . . .	58
Advancements in Tomographic Background Oriented Schlieren (Tomo-BOS) for Thermal Plume Characterization: Application for Solar Components to Urban Dynamics Analysis., Ibrahim Osman [et al.] . . . . .	59
RESEARCH ON ADVANCED ABSORPTION CHILLERS BASED ON GENERATOR-ABSORBER HEAT-EXCHANGE CYCLE POWERED BY SOLAR HEAT, Van Kha Pham [et al.] . . . . .	61
Transferts radiatifs dans les photoréacteurs : cas de milieux hétérogènes, avancées et limites actuelles., Enrique Ribeiro [et al.] . . . . .	62
Application of Ladybug Tool on Building Applied PV Reconfiguration under Partial Shading Condition, Chuanyong Shao [et al.] . . . . .	64
Experimental and Simulated Performance of a Solar Thermal System with Evacuated Tube Collectors Used for Agricultural Building Heating, Mehdi Salah [et al.] . . . . .	66
Couplage du modèle de canopée urbaine TEB avec le modèle radiatif SPARTACUS-Urban et évaluation de l'absorption solaire avec le modèle de référence HTRDR-Urban basé sur la méthode de Monte-Carlo, Robert Schoetter [et al.] . . . . .	67
Etude numérique et expérimentale d'un système de valorisation de l'énergie solaire thermiques des routes pour les besoins des bâtiments, Prince Sevi [et al.] . . . . .	69
Caractérisation thermique d'un béton de chanvre intégrant un matériau à changement de phase bio-sourcé, Hachmi Toifane [et al.] . . . . .	71

Thermophotovoltaics for solar/power-to-heat-to-power energy conversion, Rodolphe Vaillon . . . . .	72
Projet FlexTASE - Flexibilités des systèmes énergétiques avancés, Frédéric Wurtz [et al.] . . . . .	74
Caractérisation thermophysique d'un matériau à changement de phase (MCP) de type paraffine par méthode inverse et mesures de flux, Laurent Zalewski [et al.] .	76
<b>Liste des auteurs</b>	<b>77</b>

# Analyse de la Méthode de Mesure des Échanges Convectifs par Fluxmétrie: Application au Photovoltaïque

Baptiste Amiot <sup>\*† 1</sup>, Hervé Pabiou <sup>2</sup>, Le Berre Rémi <sup>3</sup>, Stephanie Giroux-Julien <sup>4</sup>, Martin Ferrand <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA) – Ecole des Ponts ParisTech, EDF RD – 6-8 Avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne 77455 Marne la Vallée Cedex 2, France

<sup>2</sup> Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) – CETHIL INSA LYON – Bât. Sadi Carnot Domaine Scientifique de La Doua 69621 VILLEURBANNE CEDEX, France

<sup>3</sup> Technologies et Recherche pour l'Efficacité Energétique (EDF RD TREE) – EDF Recherche et Développement – France

<sup>4</sup> Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) – Université Claude Bernard Lyon 1, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Centre National de la Recherche Scientifique – Bât. Sadi Carnot Domaine Scientifique de La Doua 69621 VILLEURBANNE CEDEX, France

<sup>5</sup> Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique – EDF – France

Bien que la production solaire soit le principal facteur déterminant le potentiel de production électrique des installations photovoltaïques (PV), la dépendance du processus de photoconversion à la température nécessite une prise en compte rigoureuse des effets de refroidissement, principalement issus du transfert thermique par convection. Habituellement, le coefficient de transfert thermique par convection (CHTC) est déterminé sur la base de relations empiriques obtenues dans des configurations d'installations idéalisées. Cependant, cette approche peut manquer de précision en raison de la simplification des effets aérodynamiques autour des installations, entraînant des incertitudes sur la production électrique. Par conséquent, le coût moyen de l'électricité (Levelised Cost of Electricity: LCOE) doit être réévalué tout au long de la vie d'un projet PV pour tenir compte des effets réels du refroidissement observés sur l'installation en fonctionnement. La détermination efficace du CHTC est un défi technique car elle nécessite la mesure des propriétés de la fine couche limite thermique qui se forme au-dessus de la surface de l'installation PV. La méthode conventionnelle consiste à déduire ce paramètre par un modèle inverse, dans lequel le module photovoltaïque devient un système de mesure avec ses propres limitations (hétérogénéité de la température de surface, inertie thermique). Une méthodologie expérimentale basée sur le positionnement d'un fluxmètre thermique à la surface d'un module PV permet de surmonter ce défi. Néanmoins, la conception d'un tel système est contrainte : sa taille doit être suffisamment grande pour assurer une bonne sensibilité tout en minimisant son empreinte sur les cellules photovoltaïques. De plus, le positionnement du fluxmètre sur la surface du module PV modifie localement la couche limite dynamique en introduisant une rugosité locale, ce qui affecte la mesure réalisée.

Afin de dimensionner un capteur qui optimise la détermination du coefficient de convection, un modèle conducto-convectif basé sur une approche aux volumes finis est proposé, dans lequel le module PV et le fluxmètre sont soumis à un écoulement d'air. L'impact de la taille du système de mesure sur la détermination du CHTC sera présenté. Cette approche numérique, basée sur le solveur multiphysique open-source code\_saturne, peut être décliné à d'autres systèmes soumis

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: baptiste.amiot@enpc.fr

à des contraintes aérodynamiques complexes, où le CHTC reste un verrou pour caractériser les performances énergétiques.

**Mots-Clés:** Photovoltaïque, Mécanique des fluides numériques, Convection

# Un tournant pour le stockage d'énergie thermique : Exploitation du potentiel de LiOH malgré les défis initiaux.

Fouzia Achchaq \* <sup>1,2</sup>, Philippe Legros<sup>†</sup> <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Université de Bordeaux, Institut polytechnique de Bordeaux, Centre National de la Recherche Scientifique, Arts et Métiers Sciences et Technologies – France

<sup>2</sup> Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M UMR 52 95) – CNRS, Institut Polytechnique de Bordeaux, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – 351 Cours de la Libération 33405 Talence Cedex, France

<sup>3</sup> Plateforme aquitaine de caractérisation des matériaux (PLACAMAT) – CNRS, Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – 87 Avenue Albert Schweitzer 33608 Pessac, France

L'étude traite du potentiel inexploité de l'hydroxyde de lithium (LiOH) en tant que matériau à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique. Ce matériau, reconnu pour sa très haute densité énergétique théorique (chaleur latente :  $E = 385 \text{ kWh/m}^3$  ;  $H = 875 \text{ kJ/kg}$ ), a pourtant été écarté en raison de l'impossibilité à le cycliser thermiquement, sans le dégrader. En effet, lors de nos essais expérimentaux à l'échelle macroscopique, le premier problème auquel nous étions confronté était la fuite systématique de LiOH en dehors des creusets une fois en phase liquide. Cependant, la confrontation de ces observations avec les mêmes essais menés à l'échelle microscopique (MEB *in situ* en temps réel) a montré qu'il était possible de gérer ce comportement (Brevet déposé). Après avoir surmonter ce défi technique, nous avons donc réussi à cycliser thermiquement LiOH plus de 600 fois dans une expérimentation à l'échelle du laboratoire (expérimentation toujours en cours). Sa très grande stabilité énergétique, sans décomposition chimique, a pu être ainsi établie permettant une caractérisation complète de ses propriétés thermiques : capacité calorifique, conductivité thermique et diffusivité. Les résultats présentés ici ouvrent ainsi la voie à l'utilisation de LiOH pour le stockage de l'énergie thermique par chaleurs sensible et latente d'une part (possibilité d'augmenter significativement la performance des systèmes de stockage de l'énergie thermique actuels) et d'autre part, la nécessité de reprendre les essais sur les autres sels caractérisés jusqu'ici afin de vérifier et valider leur réel potentiel. Nous présenterons un exemple avec un matériau polymorphe de  $\text{Li}_4\text{Br}(\text{OH})_3$ .

**Mots-Clés:** Hydroxyde de métal alcalin, MCP, Fonction enthalpie, température, Softening, Anisotropie thermique, TES ultra, compact.

---

\*Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: philippe.legros@placamat.cnrs.fr

# Présentation du GT SFT " Thermique Atmosphérique " et focus sur des actions du LOA en lien avec FédEsol

Frédéric André \* <sup>1</sup>, Nicolas Ferlay \*

<sup>2</sup>, Cyril Caliot <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) – Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Lille - Sciences et Technologies – France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) – Université de Lille - Sciences et Technologies, CNRS – France

<sup>3</sup> Laboatoide de Mathématique et de leurs Applications (LMAP) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], CNRS – France

Nous décrivons dans cette présentation l'activité du récent groupe thématique (GT) de la Société Française de Thermique (SFT) intitulé " Thermique Atmosphérique et Adaptation aux Changements Climatiques ". Nous reviendrons sur les missions de ce GT et notamment sur son objectif de construire des passerelles entre FédEsol, la SFT et la communauté de transfert radiatif Trattoria/INSU. Nous ferons une rapide synthèse des thèmes abordés lors des journées organisées ces trois dernières années par ce groupe thématique. Nous présenterons ensuite, comme exemple de développements aux interfaces entre les trois communautés, quelques travaux de recherche menés récemment au Laboratoire d'Optique Atmosphérique en lien avec l'énergie solaire. Les outils, la méthodologie d'analyse et les résultats (mesures, filtrages des données, outils de modélisation (propriétés optiques des particules, transfert radiatif, modèles atmosphériques) peuvent trouver des applications dans certains développements et travaux en cours au sein de la fédération FédEsol. Seront présentés, en particulier, des résultats sur l'analyse du rayonnement solaire dans les situations nuageuses 3D complexes avec couvertures fractionnaires, lieu d'effets de surbrillance, qui conduisent à des environnements solaires courants et fréquents mais tout à fait particuliers, et habituellement non pris en compte dans les modélisations du gisement solaire.

**Mots-Clés:** GT SFT, thermique atmosphérique, ressource solaire

---

\*Intervenant

# Gestion de l'intermittence d'un système de production et autoconsommation d'énergie via l'apprentissage par renforcement

Damien Bernarde \* <sup>1</sup>, Mathieu Milhe <sup>1</sup>, Jean-Louis Dirion <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement  
– Centre National de la Recherche Scientifique, IMT École nationale supérieure des Mines  
d'Albi-Carmaux – France

<sup>2</sup> IMT École nationale supérieure des Mines d'Albi-Carmaux – Institut Mines-Télécom [Paris],  
RAPSODEE – France

Les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus prépondérante dans le mix électrique mondial, d'une part car elles permettent de se rapprocher des objectifs climatiques en offrant une électricité bas carbone, mais aussi car la demande en électricité est vouée à significativement croître. Leur intermittence complique cependant leur utilisation : production et disponibilité dépendantes des aléas météorologiques, consommation pas toujours alignée avec les périodes de production, surdimensionnement et déséquilibres réseaux. Pour pallier ces inconvénients, recourir à des systèmes de stockage de l'électricité est inévitable. La gestion énergétique est assurée par un E.M.S. (Energy Management System) dont les actions sont régies par un arbre décisionnel prédéfini que l'on peut qualifier de règles. La multiplicité des systèmes de production et de stockage complexifie les décisions pouvant être prises et il n'est plus si évident que la stratégie employée soit la meilleure pour l'objectif visé : financier, ou d'indépendance du réseau, entre autres. On s'intéresse alors au potentiel de l'apprentissage par renforcement, lequel permettrait d'explorer et établir des stratégies plus performantes et impossible à implémenter par de simples règles.

Nous avons modélisé une opération d'autoconsommation avec une puissance photovoltaïque installée de 517 kWc et un unique système de stockage par batterie électrochimique 0.5C de 200 kWh, et simulé différentes stratégies de pilotage par des règles. Ces dernières servent de comparaison (i.e. benchmarks) pour qualifier les modèles de pilotage par apprentissage par renforcement (RL) développés ensuite.

On distingue ainsi nos stratégies de pilotage par les règles en 2 catégories : " temps réel " et " avec prévision ". Cette dernière dispose des prévisions de production et consommation considérées parfaites des 24 heures à venir et tient compte d'un signal tarifaire de type heures creuses ou pleines. Aussi on peut autoriser la charge de la batterie depuis le réseau, ou la restreindre à l'excédent de production photovoltaïque.

Les modèles d'IA réalisés se déclinent aussi en ces deux mêmes catégories. Ils sont entraînés avec 11 ans de données, et évalués sur une autre année distincte. Tous deux sont fondés sur l'algorithme de RL TD3 (par Fujimoto, S. et al. en 2018). L'objectif intervient directement dans l'apprentissage du modèle, puisqu'il définit la manière dont les actions prises par l'agent sont récompensées. Ici, nous avons choisi pour objectif de limiter le soutirage du réseau dans le cas " temps réel ", alors qu'on limite les coûts de soutirage du réseau dans le cas " avec prévision ", pour bénéficier de l'avantage apporté par le signal tarifaire.

---

\*Intervenant

Dans notre configuration actuelle, les agents parviennent à atteindre des performances similaires aux benchmarks bien qu'il réside un faible écart statistique inhérent au modèle de RL. Il reste néanmoins possible d'introduire d'autres critères d'évaluation, comme le nombre de cycles de charge de la batterie voire plus globalement le LCOE, ou les gains de vente de surplus sur le réseau entre autres. L'introduction d'une unité de stockage supplémentaire à saisonnalité annuelle est en cours de réalisation afin d'étudier les performances de l'apprentissage par renforcement sur des systèmes énergétiques plus complexes.

**Mots-Clés:** optimisation énergétique, stockage, apprentissage par renforcement, autoconsommation, batterie, EMS

# Energy Vector for Mobility and Building Needs

Ghada Ben Khalifa <sup>\*† 1</sup>, Anna Lushnikova <sup>\* ‡ 1</sup>, Christophe Menezo <sup>\* § 1</sup>

<sup>1</sup> LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, LCME, F-73000, Chambéry-France, CNRS – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

Climate change and energy crises are currently the most critical threats facing humankind. According to the Paris Agreement, governments accepted net-zero scenario strategies to control global warming. One of the factors that causes carbon dioxide emission is fossil fuel consumption for energy supply. To fight this crisis, we seek a comprehensive solution to meet energy demand and efficiently store excess energy production with zero carbon dioxide emission. Our focus is on implementing Zero Energy Cost Buildings (nZEcB), which aim to achieve zero or nearly zero annual energy costs. The proposed study will be based on a combinatorial approach to quantify the number of possible combinations of the various flexibility levers such as associations of production, storage, conversion and energy dissipation units, as well as demand adaptation to satisfy demand. By that we will be focusing on green hydrogen as an energy vector for mobility and building needs. We considered a case study to assess the building potential for electricity and hydrogen production potential. A parcel distribution post office is equipped with photovoltaic panels, an electrolyzer, and a fuel-cell to produce green Hydrogen. The photovoltaic electricity production is utilized for self-consumption and the surplus stored either as hydrogen or is used for charging the battery banks for future use. There are two primary options for utilizing the produced hydrogen: using advanced hydrogen vehicles or generating electricity with a fuel cell unit to meet the building electrical needs. A consumption strategy was implemented to reduce the total energy losses. For this study, the spatial scale will range from the level of the building to urban areas. Below the neighborhood level, production and consumption are matched by means of microgrids that need to be aggregated in order to contribute to flexibility. Furthermore, evaluating the project's cost-benefit using tools like Net Present Value (NPV) is essential.

**Mots-Clés:** energy vector, hydrogen, Photovoltaic, NPV, climate change

---

\*Intervenant

† Auteur correspondant: ghadabkf0@gmail.com

‡ Auteur correspondant: anna.lushnikova@univ-smb.fr

§ Auteur correspondant: christophe.menezo@univ-smb.fr

# Étude numérique de l'évaporation au sein d'une centrale photovoltaïque flottante

Baptiste Berlioux \*<sup>1,2</sup>, Baptiste Amiot<sup>3</sup>, Martin Ferrand<sup>3,4</sup>, Le Berre Rémi<sup>5</sup>, Hervé Pabiou<sup>6</sup>, Ronnie Knikker<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Technologies et Recherche pour l'Efficacité Energétique (EDF RD TREE) – EDF Recherche et Développement – France

<sup>2</sup> Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) – CETHIL INSA LYON – Bât. Sadi Carnot Domaine Scientifique de La Doua 69621 VILLEURBANNE CEDEX, France

<sup>3</sup> Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA) – CEREA, École des Ponts and EDF R – 6-8 Avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne 77455 Marne la Vallée Cedex 2, France

<sup>4</sup> Mécanique des Fluides, Energies et Environnement (EDF RD MFEE) – EDF Recherche et Développement – France

<sup>5</sup> Technologies et Recherche pour l'Efficacité Energétique (EDF RD TREE) – EDF Recherche et Développement – France

<sup>6</sup> Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) – CETHIL INSA LYON – Bât. Sadi Carnot Domaine Scientifique de La Doua 69621 VILLEURBANNE CEDEX, France

<sup>7</sup> Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) – CETHIL INSA LYON – Bât. Sadi Carnot Domaine Scientifique de La Doua 69621 VILLEURBANNE CEDEX, France

Ces dernières années, le secteur du photovoltaïque flottant (PVF) a enregistré une croissance remarquable, attribuable aux multiples bénéfices associés à ce type d'installation. Cela représente notamment une solution innovante pour pallier le déficit de surfaces terrestres exploitables et pourrait aboutir à une diminution significative de l'évaporation des réservoirs d'eau. En effet, les éléments constitutifs de ces centrales PVF recouvrent en partie la surface libre, modérant ainsi les impacts du vent sur la surface de l'eau, ce qui devrait en conséquence restreindre l'évaporation.

L'eau devenant une ressource critique et rare, la nécessité de trouver des stratégies de préservation de l'eau n'a jamais été aussi prononcée. Actuellement, l'estimation de l'évaporation repose principalement sur des lois empiriques prenant en compte des variables telles que le vent local, l'humidité ambiante, la température de l'air et de l'eau, ainsi que les caractéristiques de la centrale PVF. Afin de mieux estimer la réduction de l'évaporation, une modélisation fine est nécessaire prenant en compte tous les facteurs d'impact.

Pour relever ce défi, notre étude introduit une nouvelle approche utilisant des simulations de mécanique des fluides numériques (CFD) pour modéliser les conditions à micro-échelle au-dessus d'un réservoir partiellement couvert par une centrale PVF. Dans cette étude, la centrale est modélisée par une surface rugueuse équivalente et le transfert de vapeur d'eau est pris en compte par le biais d'un coefficient d'échange de masse. Ces quantités sont imposées à l'aide de corrélations dérivées d'un modèle bi-périodique 2D, principalement basées sur les caractéristiques du vent (vitesse de frottement, directions du vent) prenant en compte les caractéristiques de la structure flottante (hauteur, angulation, inclinaison, flotteur, etc.). Ainsi, cette méthode, du fait de la représentation implicite de la centrale, permet une plus grande liberté de modélisation avec, en vue d'une optimisation géométrique, une paramétrisation aisée de la taille et du positionnement des îlots, du taux de recouvrement, etc.

---

\*Intervenant

Toutefois, l'évaporation est un phénomène hautement non linéaire, qui dépend à la fois des conditions d'écoulement et de la couverture. Cette étude se concentre donc sur ce dernier point, en comparant deux configurations PVF distinctes et leur potentielle réduction de l'évaporation. Les configurations retenues sont représentatives des deux catégories de systèmes les plus répandus. La première configuration PVF implique un système à grande couverture, caractérisé par un taux de couverture au sol (Ground Coverage Ratio : GCR, ratio entre la longueur du module et la longueur inter rangée) de 75 %, et un taux de couverture de l'eau (Water Coverage Ratio : WCR, à savoir la surface en contact direct avec le plan d'eau, y compris les flotteurs, la structure, voire directement le panneau dans certains cas), de 60 %. Tandis que la seconde configuration PVF représente un système à faible taux de recouvrement avec un GCR de 57 % et un WCR de 10 %. Ces deux configurations sont comparées pour analyser l'influence respective de ces deux paramètres clés sur l'évaporation et la température des modules.

**Mots-Clés:** Photovoltaïque flottant, PVF, CFD, MicroClimat, Evaporation, Modélisation

# Comparaison de la performance thermomécanique de géométries d'absorbeurs tubulaires pour centrales solaires à tour

Florian Bonzoms <sup>1</sup>, Reine Reoyo-Prats <sup>\*† 2</sup>, Stéphane Thil <sup>3</sup>, Olivier Faugeroux <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – CNRS – Tecnosud, Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

<sup>2</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – CNRS – Tecnosud, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan, France

<sup>3</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – CNRS – Tecnosud, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan, France

<sup>4</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – CNRS – Tecnosud, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan, France

Les centrales solaires à concentration représentent une solution prometteuse dans la transition énergétique. Un grand nombre d'études vise à améliorer leurs performances. Ces centrales permettent la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique à insérer au réseau. Les absorbeurs, première étape de la conversion, transforment l'énergie radiative en énergie thermique. Ils sont aujourd'hui généralement fabriqués en Inconel, cependant, ce matériau ne permet pas d'atteindre des températures de plus de 1000 °C, ce qui limite le rendement global de la centrale. Les caractéristiques attendues pour un matériau constitutif d'un récepteur de bonne qualité sont la tenue en température, à l'oxydation, une bonne conductivité thermique et un faible coefficient de dilatation thermique. C'est pour cela que le carbure de silicium (SiC) semble être un bon candidat. Son inconvénient majeur est sa faible capacité de déformation engendrant un comportement mécanique fragile (rupture soudaine et non prévisible).

Une fois que l'énergie radiative a été convertie en chaleur par le tube absorbeur, il faut récupérer cette chaleur afin de la convertir en électricité. Le fluide caloporteur, qui occupe une place primordiale dans la cinétique de la récupération de la chaleur, fait également l'objet de nombreuses études. Dans ce domaine, une étude a montré tout le potentiel des lits fluidisés.

Le projet SiCsun s'inscrit dans une suite de travaux qui visent à développer un récepteur à haute efficacité et haute température ( $> 1000$  °C) dont le tube absorbeur sera en SiC et utilisera un lit de particules fluidisées en tant que fluide caloporteur. Le SiC est un matériau qui semble être un bon candidat malgré son comportement fragile et les particules du lit fluidisé permettent de très bons coefficients de transfert thermique tout en acceptant des températures importantes. La première étape de développement du tube absorbeur est de définir la structure et la géométrie du tube. Une étude sur les brasures BraSiC® a montré qu'il était important d'éviter la présence d'une brasure dans la zone insolée. La structure retenue est donc un tube homogène, dont la géométrie reste encore à définir, ce qui est l'objet de la présente communication.

Dans cette communication nous présenterons les différentes géométries étudiées (extérieur du tube dépendant des contraintes industrielles) ainsi que le modèle thermomécanique qui a été

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: reine.reoyo@promes.cnrs.fr

développé à l'aide du logiciel Salome-meca. Nous présenterons les champs de température obtenus, la répartition des contraintes au sein de ces géométries ainsi que leur probabilité de rupture, basée sur un modèle de Weibull. L'objectif est d'aboutir à une géométrie qui minimise les contraintes thermomécaniques et limite ainsi le risque de rupture lors de la prochaine étape de validation expérimentale.

**Mots-Clés:** récepteur solaire à concentration, carbure de silicium, contraintes thermomécaniques

# Modèle thermoélectrique distribué d'un module PV: effet des conditions aux limites inhomogènes.

Fadi Mehdi Bourarach \* <sup>1</sup>, Arttu Tuomiranta <sup>2</sup>, Stéphane Gibout <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Thermique Énergétique et Procédés (EA1932) – Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

<sup>2</sup> Total Energies – Direction R – France

<sup>3</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université de Pau et des Pays de l'Adour – Avenue de l'Université - BP 576 - 64012 Pau Cedex, France

La rareté des sites disponibles pour les installations solaires photovoltaïques (PV) au sol classiques, en raison de la faible densité de puissance des panneaux solaires PV (1), a conduit à l'émergence de nouveaux systèmes PV visant à résoudre le conflit avec les besoins résidentiels et agricoles (2, 3), dans le cadre du SGD 7 (4). La modélisation précise des performances PV nécessite une connaissance de la température des cellules, et la prédiction de cette température devient progressivement plus difficile en raison de leurs nouvelles caractéristiques de conception (3, 5, 6), ce qui impacte le rendement et donc leur retour sur investissement. Les modèles thermiques existants développés pour les systèmes PV conventionnels présentent plusieurs limitations, ce qui conduit à des estimations atténuées de la température des cellules (5). Plusieurs études montrent une distribution variée du coefficient d'échange de chaleur convectif ( $h_{\text{coe f f}}$ ) sur l'installation PV en fonction de sa configuration géométrique (6, 7, 8). Cela implique la nécessité d'explorer des approches thermiques plus avancées. Dans cette communication, nous introduisons un modèle physique à volume fini inertie à 5 couches qui intègre une distribution locale de  $h_{\text{coe f f}}$  en tant qu'entrée. Il comprend un modèle thermique 3D couplé à un modèle électrique de deux manières, le premier couplage résidant dans l'effet thermique classique sur l'efficacité de la cellule et le second couplage considère la disposition de connexion électrique des cellules PV. Le modèle est développé en utilisant des bibliothèques open source telles que PVlib et sera validé d'abord numériquement puis expérimentalement. Numériquement, en étant comparé au modèle à une couche validé par Sandia (9). Expérimentalement, en utilisant plusieurs expériences contrôlées sur un seul module

---

\*Intervenant

et en utilisant des données provenant d'installations PV déployées par TotalEnergies. Ces validations seront effectuées avec un  $h_{\text{coe f f}}$  constant car cela nécessite un modèle développé pour estimer sa distribution spatiale. En effet, ce travail constitue un pont vers un modèle CFD plus détaillé pour les installations PV. Ne se concentrant pas sur le calcul du  $h_{\text{coe f f}}$ , dans un premier temps, nous estimerons la perte de puissance électrique due à la distribution non homogène de  $h_{\text{coe f f}}$  qui affectera la production électrique en réduisant la puissance continue globale causée par l'augmentation de la température local des cellules.

**Mots-Clés:** Photovoltaïque, modèle thermique distribué, convection, inhomogène

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

Cyril Caliot \* <sup>1</sup>, Louis D'alencçon <sup>2</sup>, Stéphane Blanco <sup>3</sup>, Vincent Forest <sup>4</sup>,  
Richard Fournier <sup>3</sup>, Frédéric Hourdin <sup>2</sup>, Florent Retailleau <sup>5</sup>, Robert  
Schoetter <sup>6</sup>, Najda Villefranque <sup>6</sup>

<sup>1</sup> LMAP UPPA CNRS – CNRS : UMR5142 – France

<sup>2</sup> LMD CNRS – Sorbonne Université, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, LERMA-IPSL, 75005 Paris, France. – France

<sup>3</sup> LAPLACE CNRS – Université Paul Sabatier - Toulouse III – France

<sup>4</sup> |Més|Star> – |Més|Star>, Més-Star – France

<sup>5</sup> LMAP CNRS – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA] – France

<sup>6</sup> CNRM CNRS – MétéoFrance – France

La modélisation des transferts de chaleur dans une géométrie urbaine constitue une étape clé pour prévoir l'îlot de chaleur urbain, le confort extérieur des piétons et la consommation énergétique des bâtiments ainsi que pour quantifier l'effet des mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Une difficulté réside dans le passage à l'échelle de ces simulations qui doivent intégrer la morphologie urbaine complexe constituée de divers matériaux. Pour répondre à cet enjeu, une approche probabiliste de la résolution des transferts de chaleur est présentée qui utilise la méthode de Monte-Carlo connue pour son insensibilité aux géométries et conditions aux limites complexes. La formulation intégrale est présentée avec les marches aléatoires pour la conduction et les rayonnements thermique et solaire. Une validation numérique est présentée dans une application de pont thermique en géométrie tridimensionnelle. Ensuite, le modèle probabiliste de transfert de chaleur est appliqué à un scénario de vague de chaleur où sont calculées : la température radiante moyenne extérieure montrant l'influence des arbres ; et la température moyenne intérieure des murs montrant l'influence des apports solaires à travers les ouvertures.

**Mots-Clés:** transferts de chaleur couplés, Monte Carlo, flux solaires, confort thermique intérieur et extérieur, consommation énergétique du bâtiment, inertie et isolation thermique

---

\*Intervenant

# Dynamic optimization models for optimal PV orientation using the heterogeneity of urban form

Farzaneh Changizi <sup>\*† 1</sup>, Martin Thebault <sup>2</sup>, Christophe Menezo <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Savoie Mont Blanc (USMB [Université de Savoie] [Université de Chambéry]) – Laboratoire LOCIE UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc - CNRS – 27, rue Marcoz - 73000 Chambéry, France

<sup>2</sup> Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l’Environnement (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Savoie Mont Blanc : UMR5271 / FRE3220 – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>3</sup> LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, LCME, F-73000, Chambéry-France, CNRS – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

Solar photovoltaic (PV) is one of the promising solutions for generating on-site electricity that is needed for local use in the urban context. It is recognized that certain factors, such as the orientation (azimuth) and inclination (tilt) of PV panels, can influence PV production, which highly contributes to key PV performance indicators (KPIs) such as self-consumption and self-sufficiency. The heterogeneity of urban form can provide opportunities for integrating PV panels as it offers various urban envelope orientations. Integrating PV panels onto building facades alongside rooftops holds the potential to enhance load-supply alignment and economic benefits. This paper investigates this proposition by analyzing a case study including buildings with varying orientations in Chambéry, France. Leveraging weather data, power production for each building facade is calculated, and the effects of azimuthal changes are assessed. Subsequently, KPIs are evaluated for various load profiles (e.g., residential, and commercial), and some optimization models are developed. Primarily, the first optimization model (load-supply match) is used to acquire the surface area that presents the least difference between load and supply. Secondly, the economic optimization model (e.g., Net Present Value) is developed to evaluate the optimal benefits and least costs of considered PV integrations. Furthermore, several future scenarios are introduced to evaluate the influence of variation of load profiles, and future changing climate (higher temperature) on final outcomes of the model. Results regarding the optimal solution of the models are reported. Findings indicate a strong correlation between building orientation and the PV panel area required for load matching, given constant building size and load profiles. Moreover, disparities in load profiles, underscore the significance of building orientation in optimizing load-supply alignment. This study contributes valuable insights to existing literature, emphasizing the importance of identifying optimally oriented buildings in urban contexts to improve load-matching efficiencies by considering the evolving nature of future thermal change that could influence the load profiles in urban context.

## Acknowledgement :

This study is supported by the ANR PEPR project *FlexTASE*

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: changizf@univ-smb.fr

**Mots-Clés:** photovoltaic, orientation, load, matching, envelope, optimization, climate change

# Energy management system for optimal operation of a solar-driven district heating and cooling network near the Lac du Bourget in France

Malihe Davari\* <sup>1</sup>, Jaume Fito <sup>† 2</sup>, Julien Ramousse <sup>†</sup>

3

<sup>1</sup> Università degli studi di Genova = University of Genoa (UniGe) – Via Balbi, 5 - 16126 Genova, Italie

<sup>2</sup> LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, LCME, F-73000, Chambéry-France – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>3</sup> LabOratoire proCédés énergles bâtimEnt (LOCIE) – University Savoie Mont-Blanc - CNRS, Le Bourget-Du-Lac, France – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

In response to escalating environmental concerns and the need for sustainable solutions, the exploration of renewable energy sources (RES) has become a topic of paramount importance. The transition to RES not only contributes to the reduction of greenhouse gas emissions but also offers a pathway towards energy independence and resilience. This paper delves into this critical issue, focusing on the optimal integration of RES in the built environment, a sector with significant potential for energy efficiency improvements and carbon footprint reduction.

The integration of RES is crucial for achieving sustainable and cost-effective energy solutions. This study explores the optimal configuration of energy systems for the Bourget Du Lac district in France, which comprises three buildings.

Two scenarios are analyzed, each featuring different systems for heating, cooling, domestic hot water (DHW), and electrical power demands. In scenario 1, each building is equipped with three heat pumps: one for DHW, one for space heating, and one for cooling. In Scenario 2, each building utilizes two heat pumps: one for space heating and one for DHW, while cooling is achieved using cold water from a nearby lake with a temperature of 7°C. Additionally, solar thermal (ST) systems serve as the primary DHW provider in Scenario 2. Both scenarios include photovoltaic (PV) panels for generating electrical power and maintain a connection to the grid.

The objective function of this study focuses on minimizing the total cost and optimizing the PV surface area in Scenario 1, while Scenario 2 involves optimizing both PV and ST surface areas. Furthermore, the potential for selling surplus power back to the grid during peak periods is considered, aiming to enhance economic viability.

This research compares the two scenarios to determine which configuration offers the best performance in terms of cost efficiency and sustainability.

---

\*Auteur correspondant: malihedavari1996@gmail.com

<sup>†</sup>Intervenant

**Mots-Clés:** réseau de chaleur, gestion anticipative, solaire thermique, optimisation linéaire

# Panneaux solaires photovoltaïques-thermiques (PVT) pour seule source froide d'une pompe à chaleur

Valentin Delachaux \*<sup>1</sup>, Rachid Bennacer<sup>†</sup><sup>2</sup>, Laetitia Brottier<sup>‡</sup><sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS) – Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France), Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, Centrale Supélec – 4 avenue des sciences / 8-10 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS) – Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France), Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, Centrale Supélec – 4 avenue des sciences / 8-10 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup> Dualsun – – 2 rue Marc Donadille 13013 Marseille, France

La source de chaleur la plus courante pour les pompes à chaleur (PAC) est l'air ambiant. Dans ce cas, l'échangeur de chaleur est compact et équipé d'un ventilateur externe, à l'extérieur. Comparée aux autres sources de chaleur, cette solution est facile à installer pour tout bâtiment, est abordable mais offre des performances moindres, en particulier dans les climats froids. Elle est très sensible au givrage en raison de la convection forcée et de la compacité de l'échangeur. Pour pallier cette faiblesse, l'idée est de "déplier" cet échangeur de chaleur extérieur sur le toit afin de bénéficier de l'énergie solaire, qui pourrait fournir une quantité importante d'énergie thermique et faire fondre la glace lorsqu'elle s'est formée pendant la nuit. Il est même possible de faire d'une pierre deux coups : les panneaux photovoltaïques-thermiques (PVT) peuvent à la fois alimenter l'évaporateur du HP - avec en option un stockage tampon en amont - et produire de l'électricité pour faire fonctionner son compresseur. Dans cette catégorie, la technologie WISC (Wind, and Infrared Sensitive Collector) à liquide est la plus appropriée car c'est celle qui permet d'avoir la puissance thermique la plus élevée la nuit et suffisante le jour (basse température de fonctionnement). Ce type de panneau est constitué d'un panneau photovoltaïque standard et d'un échangeur de chaleur à l'arrière. L'objectif est, à service égal, d'obtenir un meilleur SPF que la PAC air/eau, à moindre coût et avec une bien plus grande facilité d'installation et de déploiement que la géothermie.

Il existe de nombreuses configurations possibles pour les systèmes de chauffage PAC avec PVT, comme le décrivent les rapports de la *Task 60* de l'AIE (2), (3) et (4). Le champ PVT peut être associé à des sondes géothermiques (5) ou à un échangeur de chaleur air/eau comme source d'appoint (6). Nous étudions le cas où le champ est la seule source et alimente directement la pompe à chaleur. Dans (7), un tel système pour des maisons individuelles avec un nouveau capteur PVT non vitré à liquide a été modélisé sur TRNSYS et les simulations annuelles ont révélé un SPF prometteur.

Le jour, les panneaux solaires PVT collectent suffisamment d'énergie du soleil pour atteindre un COP élevé pour la PAC. A la tombée de la nuit, nous voulons éviter de démarrer l'appoint électrique et même conserver un COP moyen tout en maintenant une température adéquate à l'intérieur du bâtiment jusqu'au lever du soleil. Ainsi, ils doivent continuer à fournir une puissance thermique significative à la pompe à chaleur. Les seules sources de chaleur sont alors d'une

---

\*Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: rachid.bennacer@ens-paris-saclay.fr

<sup>‡</sup>Auteur correspondant: laetitia.brottier@dualsun.fr

part l'air ambiant par convection et d'autre part le ciel et le toit par rayonnement. La situation est encore plus critique en hiver, avec une charge de chauffage élevée, lorsque la température ambiante est basse et qu'il y a peu de vent.

Il est donc nécessaire d'avoir une conception spécifique des capteurs PVT. C'est l'objectif de notre projet, qui inclut le comportement thermique, l'hydraulique, la faisabilité de la fabrication, le poids, la facilité d'installation et les contraintes de coût.

**Mots-Clés:** photovoltaïque, thermique (PVT), pompe à chaleur, bâtiment, chauffage, eau chaude sanitaire (ECS), stockage, optimisation

# Recherche de solutions de rénovations énergétique à l'échelle d'une métropole : Étude numérique et in situ du confort thermique a l'échelle d'une métropole.

Lucas Estay <sup>\*†</sup> <sup>1</sup>, Stéphane Ginestet <sup>1</sup>, Marion Bonhomme <sup>1</sup>, Claire Oms <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions – Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier – France

<sup>2</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université Paul Sabatier, Toulouse France – France

Le parc de bâtiment est le premier consommateur d'énergie en France. A l'échelle européenne, il est responsable de la plus grande partie des émissions des gaz à effet de serre. De plus, on estime que les  $\frac{3}{4}$  des logements de 2050 existent déjà.

La rénovation représente un enjeu majeur de l'efficacité énergétique et environnementale du parc de bâtiments existant. Elle représente également un impact important de réduction de consommation et de dépendance énergétique du territoire.

En France, le bâti ancien des centres urbains ou des périphéries des villes petites et moyennes, peu adapté aux exigences thermiques et au confort moderne, est souvent délaissé. L'objectif du projet Européen I-HEROS est de promouvoir la rénovation du patrimoine bâti tout en veillant à préserver le confort d'été, en particulier à Toulouse où les étés peuvent être caniculaires.

Des solutions techniques de rénovation existent, mais leur mise en œuvre engendre des parfois des effets indésirables. Par exemple, certaines opérations de réhabilitation énergétique engendrent l'augmentation d'apports thermiques internes et ont donc un impact négatif sur le confort d'été. C'est notamment le cas de l'éclairage artificiel.

On constate aussi que l'usage de la climatisation limite les efforts d'adaptation des occupants. Ainsi, en réponse aux problématiques de canicule, d'îlot de chaleur urbaine et de réchauffement climatique, le nombre de climatiseurs se multiplie avec un impact négatif sur la consommation énergétique et le microclimat urbain.

L'objectif de cette étude est d'estimer la qualité de différentes solutions de rénovations pour le parc de logements toulousain. Un bâtiment rénové, simulé avec le logiciel Energy+, a été sélectionné pour être représentatif des caractéristiques du territoire. L'instrumentation de ce bâtiment occupé a permis la validation des hypothèses et du modèle de simulation.

Le couplage avec un logiciel d'étude paramétrique a rendu possible la comparaison d'un grand nombre de solutions de rénovation sur le plan numérique. Plusieurs paramètres tels que l'impact des protections solaires, des types d'isolations, type de menuiserie, ..., ont été testé simultanément pour obtenir un compromis entre confort d'été et consommations énergétiques.

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: lucas.estay@insa-toulouse.fr

La mise en perspective des résultats de confort thermique avec les prévisions météo IPCC a permis de rendre compte de l'importance de la prise en considération ce domaine dans le choix de solutions de rénovation pour l'avenir.

**Mots-Clés:** Simulation numérique, Confort estival, Rénovation énergétique

# Amélioration d'un système à réflecteur de Scheffler pour satisfaire les besoins de la cuisine solaire

Thomas Fasquelle <sup>\*†</sup> <sup>1</sup>, Gabriel Guillet <sup>2</sup>, Benjamin Kadoch <sup>2</sup>, Séverine Barbosa <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (IUSTI) – Aix-Marseille Université - AMU, CNRS – Laboratoire IUSTI, Technopôle de Château-Gombert, 5 rue Enrico Fermi 13453 Marseille cedex 13 FRANCE, France

<sup>2</sup> Institut universitaire des systèmes thermiques industriels – Aix Marseille Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7343, Aix Marseille Université : UMR7343 – France

Les réflecteurs de Scheffler sont des concentrateurs flexibles qui présentent l'avantage d'avoir un point focal fixe et un seul axe de rotation pour assurer le suivi du Soleil. Dès lors, le flux solaire concentré peut être dirigé vers l'intérieur d'un bâtiment dans lequel une cuisine est aménagée. Une thèse de doctorat vient de s'achever au laboratoire IUSTI sur ce sujet. Les résultats expérimentaux obtenus avec un réflecteur de Scheffler de 8 m<sup>2</sup> donnent des informations sur la forme et l'amplitude du flux concentré sur un plan vertical (95% de la puissance, soit 2.5 kW, dans un cercle de 26 cm de diamètre, courbe Gaussienne), ainsi que sur les performances du cuiseur comprenant une optique secondaire simple et contraint par les besoins de l'utilisateur (< 1 kW de puissance utile). La méthode utilise à la fois une caméra thermique associée à des techniques inverses mais aussi des tests standards de cuiseurs solaires. En complément, un modèle numérique a été développé pour simuler le système sous le logiciel Soltrace et avec la méthode Monte-Carlo de lanciers de rayons. Ce modèle a été calibré sur les résultats expérimentaux avant d'être utilisé pour évaluer la sensibilité du réflecteur aux erreurs de positionnement et d'ajustement. Le modèle est ainsi utilisé pour dimensionner de nouvelles optiques secondaire qui sont actuellement testées expérimentalement au laboratoire..

**Mots-Clés:** Cuisine Solaire, Thermographie, Soltrace

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: thomas.fasquelle@univ-amu.fr

# Empreinte environnementale de l'électricité solaire avec stockage pour le suivi de charge

Thomas Fasquelle <sup>\*†</sup> <sup>1</sup>, Yasmine Lalau <sup>\*</sup>

<sup>2</sup>, Alexis Vossier <sup>3</sup>, Freddy Ordoñez <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (IUSTI) – Aix-Marseille Université - AMU, CNRS – Laboratoire IUSTI, Technopôle de Château-Gombert, 5 rue Enrico Fermi 13453 Marseille cedex 13 FRANCE, France

<sup>2</sup> Université de Toulouse, IMT Mines Albi, CNRS UMR 5302, Centre RAPSODEE – IMT Mines Albi, RAPSODEE – France

<sup>3</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – CNRS : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-Romeu, France

<sup>4</sup> Escuela Politécnica Nacional (EPN) – Av. Ladrón de Guevara E11-253, Quito 170143, Équateur, Équateur

Le déploiement massif de centrales de production d'électricité renouvelable est une condition *sine qua non* pour limiter l'impact du réchauffement climatique dans les décennies à venir. L'intégration croissante des systèmes de stockage d'énergie, dans le but de favoriser une meilleure adéquation entre la demande et la production solaire, conduira à des pertes énergétiques spécifiques qui sont susceptibles d'affecter les indicateurs techniques, économiques et environnementaux des prochaines générations de centrales solaires. L'objectif de ce travail est d'évaluer comment l'intégration croissante des systèmes de stockage d'énergie est susceptible d'affecter à la fois les indicateurs techniques et économiques des centrales, ainsi que l'empreinte carbone de l'électricité produite. Dans ce travail, les performances de deux technologies de production d'électricité solaire sont évaluées et comparées : 1) les systèmes de conversion photovoltaïque (PV), qui reposent sur la conversion directe de l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque ; 2) les systèmes de conversion thermodynamique (CSP), qui utilisent la chaleur comme vecteur énergétique et qui peut ensuite être stockée ou convertie en électricité à l'aide d'un groupe de puissance. Elles sont associées à trois technologies différentes de stockage de l'énergie : 1) le stockage d'énergie électrochimique, 2) le stockage d'énergie thermique et 3) le stockage d'énergie thermophotovoltaïque.

À cette fin, un modèle numérique a été développé pour déterminer la production d'énergie des différentes centrales électriques étudiées en fonction du profil de la demande du réseau électrique. Ensuite, l'empreinte carbone associée à ces moyens de production d'électricité est évaluée. En combinant ces deux outils, il est possible d'estimer comment l'augmentation de la pilotabilité des centrales solaires, combinée à l'intégration croissante du stockage, conduira à une augmentation de l'empreinte carbone de l'électricité solaire injectée dans le réseau. En comparant les indicateurs techniques et environnementaux des différentes technologies étudiées, nous serons alors en mesure d'identifier 1) quelles sont les technologies les mieux à même de répondre à la demande croissante d'électricité avec un impact environnemental minimal 2) quels sont les composants "clés" des différentes technologies de conversion et de stockage qui doivent être développés afin d'améliorer l'empreinte environnementale de l'électricité produite.

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: thomas.fasquelle@univ-amu.fr

**Mots-Clés:** Simulation, Systèmes énergétiques, Analyse de Cycle de Vie, Analyse Technicoéconomique, Stockage

# Optique FreeForm : un beamdown de 300 kW pour le Grand Four d'Odeillo

Emmanuel Guillot \* <sup>1</sup>, Nicolas Boulet <sup>2</sup>, Jean-Louis Sans <sup>1</sup>

<sup>1</sup> PROMES-CNRS – CNRS : UPR8521 – Centre Felix Trombe 7 rue du four solaire 66120 FONT ROMEU ODEILLO VIA, France

<sup>2</sup> PROMES-CNRS – CNRS : UPR8521 – Centre Felix Trombe 7 rue du four solaire 66120 FONT ROMEU ODEILLO VIA, France

## Introduction

L'optique FreeForm est une méthode récente et performante pour concevoir des optiques inhabituelles en définissant uniquement les rayons lumineux d'entrée et de sortie du système optique. Nous avons appliqué cette méthode pour concevoir une optique de renvoi vertical du faisceau solaire concentré (ou beamdown) pour le plus grand four solaire de la planète, le grand four solaire de 1000 kW d'Odeillo, en France, afin d'obtenir un faisceau solaire de haute puissance et de haute densité, mais avec un axe vertical au lieu de l'axe horizontal d'origine.

## Le Grand Four d'Odeillo

Le laboratoire PROMES-CNRS exploite le grand four solaire de 1000 kW depuis 1968 à Font Romeu Odeillo, en France. Cette installation permet d'étudier des procédés de valorisation de l'énergie solaire mais aussi d'étudier des matériaux jusqu'à 3500°C sur une surface de 1 m de diamètre, en collectant l'énergie solaire grâce à 63 héliostats puis en la concentrant avec un miroir parabolique de 9000 facettes à l'intérieur d'une tour qui abrite le dispositif expérimental et la salle de contrôle.

## La conception optique FreeForm

Les objectifs d'une conception FreeForm pour un système optique peuvent être des cartes d'illumination, l'orientation des rayons, ou encore le contrôle des aberrations ou de la résolution pour des applications d'imagerie... Ces méthodes sont utilisées pour adapter les optiques à des applications haut de gamme, telles que la défense et l'industrie aérospatiale, ou à des applications à faible coût de grand volume, telles que l'éclairage par LED. Il existe différentes approches pour concevoir des composants FreeForm à surface unique ou à surfaces multiples, et selon les objectifs et contraintes.

## Objectif du BeamDown

Le but de cette optique est de tester des procédés à l'échelle prototype (TRL 4 à 7, 100 à 300 kWth), y compris :

- Applications thermiques industrielles : développement de procédés métallurgiques jusqu'à 1500°C ;
- Applications énergétiques : cycles thermochimiques et conversion TPV jusqu'à 2000°C.

---

\*Intervenant

L'ajustement de la puissance et de la densité de puissance seront notamment réalisés en ajustant le point de visée des héliostats grâce à des techniques récemment développées par algorithme génétique.

### **Conception et test du BeamDown**

Le BeamDown idéal conçu en optique FreeForm est discrétisé par modules pour chaque héliostat indépendant, et qui seront réglables individuellement pour plus de flexibilité et une maintenance plus aisée. Chaque module est ensuite discrétisé en facettes miroirs élémentaires, pour des compromis de performance-coût-maintenance. Cette approche est validée avec le lancer de rayons SOLSTICE.

La puissance maximale sera limitée par la contrainte thermique sur chaque module refroidi par eau : la conception actuelle peut atteindre les 300 kWth visés en simulation, mais cette valeur sera définitivement validée en 2025 sur l'optique en conditions réelles. À l'été 2024, un premier prototype à échelle réduite sera testé pour 4 à 6 héliostats au lieu des 15 à 25 visés en 2025. Ce travail est cofinancé par le Labex SOLSTICE: ANR-10-LABX-22-01 géré par l'ANR.

**Mots-Clés:** optique, concentration, lancer de rayons, monte Carlo, odeillo, four solaire

# Les installations solaires de PROMES-CNRS : la Grande Infrastructure de Recherche FR-SOLARIS

Emmanuel Guillot <sup>\*† 1</sup>, William Baltus <sup>2</sup>, Nicolas Boulet <sup>2</sup>, Anita Haeussler <sup>2</sup>, Antoine Perez <sup>2</sup>, Régis Rodriguez <sup>2</sup>, Jean-Louis Sans <sup>2</sup>, Michaël Tessonnaud <sup>2</sup>, Personnel De Promes <sup>\*</sup>

3

<sup>1</sup> PROMES-CNRS – CNRS : UPR8521 – Centre Felix Trombe 7 rue du four solaire 66120 FONT ROMEU ODEILLO VIA, France

<sup>2</sup> PROMES-CNRS – CNRS : UPR8521 – Centre Felix Trombe 7 rue du four solaire 66120 FONT ROMEU ODEILLO VIA, France

<sup>3</sup> PROMES-CNRS – CNRS : UPR8521, Université de Perpignan Via Domitia – Centre Felix Trombe 7 rue du four solaire F-66120 FONT ROMEU ODEILLO VIA Tecnosud, Rambla de la thermodynamique F-66100 PERPIGNAN, France

## Identité administrative

Le laboratoire PROMES-CNRS (UPR8521), conventionné avec l'U. Perpignan, porte l'infrastructure FR-SOLARIS qui regroupe les moyens de recherche et développement expérimentaux nationaux de dimension **européenne** dans le domaine du **solaire concentré**.

FR-SOLARIS est le nœud français de l'ERIC EU-SOLARIS qui est la plus grande infrastructure de recherche sur le solaire à concentration au monde.

## Solaire à concentration

Les systèmes solaires à concentration permettent d'**accroître la densité de flux radiatif** imposée à un milieu grâce, en général, à des miroirs concaves.

En fonction des dispositifs mis en œuvre, le facteur de concentration varie de quelques dizaines à plusieurs milliers. **Ces concentrations correspondent à des températures comprises entre 100°C et 3500°C.**

Dans la zone focale, **l'utilisateur dispose ainsi soit de hautes densités de photons, soit de hautes températures, soit une combinaison des deux.**

## Domaines possibles de recherche

En conséquence, les domaines de recherche possibles sont vastes, notamment :

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: emmanuel.guillot@promes.cnrs.fr

- Systèmes de production d'électricité solaire (ex. : centrales à tour, linéaires...)
- Stockage thermique de l'énergie et intégration dans les systèmes
- Solarisation de procédés industriels – chaleur solaire industrielle (ex. : décarbonatation de calcaire pour la production de ciment, métallurgie...)
- Photophysique et photochimie (ex. : laser, photocatalyse, traitement de l'eau...)
- Thermochimie en particulier production de combustibles de synthèse tels qu'hydrogène et gaz de synthèse (SAF...)
- Thermique (en particulier : transferts radiatifs, pour l'aérospatial ou le nucléaire)
- Métallurgie (ex. : recyclage, purification, traitement de surface, frittage...)
- Nanomatériaux (ex. : élaboration de nanopoudres et nanostructures)
- Matériaux céramiques (en particulier : applications spatiales)

Une grande partie des recherches vise les technologies de conversion et de stockage de l'énergie solaire et les matériaux associés.

### Échelles possibles des travaux

Les travaux possibles commencent de l'échelle **nanométrique à la taille industrielle**, et couvrent du **TRL3** (premières expérimentations) au **TRL7** (pilote industriel).

### Modalités d'accès

L'accès aux installations solaires peut être de **l'hébergement** avec accompagnement technique, des contrats de **collaboration** ou des contrats de **prestation**.

Les partenaires et clients peuvent être privés ou publics, et sont principalement européens.

Après évaluation technique et scientifique, hors CNRS et CEA, le projet européen **RISEnergy** permettra à partir de 2025 de prendre en charge les coûts d'accès de certains projets.

Notamment pour le CNRS et le CEA, le laboratoire PROMES peut accueillir quelques projets de recherche par an sur certaines installations, en plus des collaborations.

### Implantation de l'infrastructure

FR-SOLARIS réunit un ensemble d'équipements de recherche uniques sur **2 sites dans les Pyrénées-Orientales** : les dispositifs optiques pour concentrer l'énergie solaire, accompagnés de **nombreux instruments et équipements** pour leur exploitation (réacteurs, enceintes, stations météo, capteurs, caméras...), et d'**ateliers et services supports** (informatique, mécanique, sécurité, réseaux fluides...), **le tout avec du personnel qualifié et expérimenté**.

Le **site d'Odeillo** est exploité par le CNRS depuis 1969 et constitue un parc unique au Monde avec 12 fours solaires de 1 à 1000 kW et 6000 à 16000 soleils, 1 boucle cylindro-parabolique de 150 kW, 1 dish de 50 kW.

Le **site de Thémis** est une centrale à tour avec ses 2 zones expérimentales de 5 MWth et 0.5 MWth, jusqu'à 2000 soleils.

**Mots-Clés:** four solaire, tour solaire, cylindro, parabolique, linéaire, dish, infrastructure, plateforme, odeillo

# La boulangerie solaire low-tech - Un exemple de solution socio-technique à la problématique énergétique

Guillaume Guimbretiere \*<sup>†</sup> <sup>1</sup>, Benjamin Pillot \*<sup>‡</sup> <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Transitions énergétiques et environnementales (TREE (UMR6031)) – CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA] – France

<sup>2</sup> Espace Dev- – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR228, Institut de recherche pour le développement [IRD] – France

Dans le cadre d'une situation socio-environnementale globale de dépassement de nombreuses frontières planétaires (Stockholm Resilience Centre, 2023), nous devons engager des **transitions**. Sur le volet énergétique, de nombreuses actions de R&D sont engagées pour répondre de manière substitutive au besoin de **transition énergétique**. Dans cette vision, l'électricité est le vecteur énergétique central et elle y serait produite " durablement " en substitution d'une production " carbonée non-durable ". Cette vision seule est problématique, notamment en raison des besoins en minéraux liés à l'infrastructure matérielle des systèmes énergétiques (G. Pitron, 2018). Heureusement, d'autres leviers peuvent-être activés comme ceux de la démarche **low-tech** (G. Guimbretiere *et al.*, 2022) et de la **sobriété énergétique** (E. Toulouse, 2020) qui demandent de faire un pas de côté en pensant différemment notre rapport à l'énergie et ses modes de gestions. *Que cela signifie-t-il concrètement ?*

Dans ce papier, nous discutons la façon dont peut-être gérer le problème de l'intermittence de l'énergie solaire dans le cadre d'une activité artisanale utilisant un chauffage obtenu par une technique low-tech de solaire à concentration directe. C'est la technique utilisée par la **boulangerie solaire** pionnière Neoloco (neoloco.fr) installée en Normandie. Sa stratégie consiste en l'intégration de l'activité artisanale dans des circuits courts locaux, une cuisson à l'énergie solaire concentrée et une méthode d'organisation d'entreprise priorisant les tâches énergivores lorsque l'énergie (intermittente) est disponible (A. Crétot, 2023). En réadaptant ses activités, il passe d'une production à la demande à une gestion par le stock. Cette vision alternative de gestion de l'intermittence de la source solaire par une adaptation socio-économique de variabilité de la production compatible avec l'outil four solaire est radicalement en rupture avec l'approche conventionnelle *Business As Usual* d'adaptation du système énergétique aux contraintes socio-économiques. Une utilisation locale et sans stockage de l'énergie solaire implique que les solutions techniques sont *situées* car dépendantes du contexte (potentiel solaire du territoire et contraintes de l'itinéraire de pratiques de l'artisan) et demandent de combiner des savoir-faire transdisciplinaires en sciences physiques et sciences sociales. La littérature sur la cuisine solaire synthétise une telle croisée des chemins : le dispositif (cuiseur solaire) a été profondément examiné et amélioré, mais des approches sociotechniques plus larges sont désormais nécessaires pour finalement déclencher des changements au niveau de la filière.

Dans ce contexte, afin d'estimer le potentiel solaire boulanger d'un territoire, nous proposons un modèle socio-technique avec une granularité spatio-temporelle qui intègre les différentes échelles

---

\*Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: guillaume.guimbretiere@univ-pau.fr

<sup>‡</sup>Auteur correspondant:

d'analyse (de la technologie boulangère au territoire où interagiront boulangers et consommateurs de pain, en fonction d'aspects tels que l'organisation de la boulangerie, le type de pain ou le comportement alimentaire de la population). Nous dérivons ensuite des indicateurs d'aide à la décision pour évaluer des informations telles que l'accessibilité et la viabilité du pain, le chiffre d'affaire du pain (pain cuit réellement consommé), le rendement économique ou l'impact environnemental.

Enfin, nous illustrons les différentes applications potentielles en produisant des résultats et des scénarios de référence sur le territoire de l'Europe occidentale.

**Mots-Clés:** Low tech, Cuisson solaire, Transition énergétique, Boulangerie, artisan solaire, modélisation numérique, scénario prospectif

# Modélisation et optimisation thermodynamique du couplage entre un stockage thermique MCP et un moteur ERICSSON pour favoriser l'intégration des EnR sur le réseau électrique

Doha Kafeh \*<sup>1</sup>, Samuel Mer \*

<sup>2</sup>, Nathalie Mazet \*

<sup>3</sup>, Régis Olivès \*

<sup>2</sup>, Pierre Neveu \*

<sup>2</sup>, Maxime Perier-Muzet \*

2

<sup>1</sup> Université de Perpignan Via Domitia (UPVD) – Université de Perpignan Via Domitia, Université de Perpignan Via Domitia – 52 avenue Paul Alduy - 66860 Perpignan Cedex 9, France

<sup>2</sup> Université de Perpignan Via Domitia Laboratoire PROMES-CNRS (UPVD PROMES) – CNRS – Tecnosud Rambla de la thermodynamique – 66100 Perpignan, France

<sup>3</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES-CNRS) – CNRS : UPR8521 – Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan, France

Ces dernières années, du fait de la nécessaire transformation du mix énergétique français, on constate un développement remarquable des énergies renouvelables (EnR) en France et plus généralement dans le monde. Une part non négligeable des EnR proviennent de sources d'énergies fluctuantes. Afin de stabiliser la production, le développement de procédés de stockage est indispensable à la pénétration des EnR sur le marché de l'énergie. Notre étude s'intéresse à un dispositif permettant la gestion des productions excédentaires d'électricité dans les centrales issues d'EnR (PV, éolien...). La solution proposée consiste à coupler un moteur Ericsson avec un système de stockage d'énergie thermique utilisant un matériau à changement de phase (MCP). Ainsi, l'électricité excédentaire est dissipée dans une résistance chauffante, noyée dans le MCP. Sous l'effet de ce flux de chaleur, ce dernier fond et la " *batterie thermique* " se charge. Le matériau utilisé dans cette étude possède une excellente stabilité thermique jusqu' à 600 °C avec une conductivité thermique supérieure à 10 W.m-1K-1, une chaleur latente supérieure à 1000 kJ.kg-1 et une capacité thermique supérieure à celle de l'eau. Durant la phase de déstockage, cette énergie est valorisée dans un moteur Ericsson. L'air, issu du compresseur est chauffé à partir de l'énergie stockée dans le MCP avant d'entrer dans l'expandeur. Nous considérons ici,

---

\*Intervenant

un moteur Ericsson à pistons liquides développé par la société ExtraJool.

Pour modéliser et optimiser ce processus, nous avons créé un modèle dynamique 1D de la batterie thermique reposant sur l'équation de la chaleur en 1D axi-symétrique - qui simule la phase de charge et de décharge. La chaleur latente de changement de phase est pris en compte au travers de la méthode de capacité thermique équivalente. Cette approche, peu coûteuse numériquement, permet de représenter le déplacement du front de fusion/solidification dans la " batterie thermique " durant son fonctionnement. Ce modèle est couplé à un modèle 0D du moteur Ericsson qui, à partir du déplacement et de la vitesse des deux pistons et en tenant compte des pertes de charges, permet de définir la puissance produite et la quantité d'énergie récupérée, ainsi que l'efficacité globale du système.

Cette étude vise à optimiser l'ensemble du système en combinant ces deux modèles pour minimiser l'entropie générée lors des transformations, notamment par les frottements visqueux et les transferts thermiques dans le système de stockage.

**Mots-Clés:** MCP, stockage EnR

# Vers une métallurgie solaire : réduction d'oxydes de fer par l'ammoniac et élaboration d'aciers sous flux lumineux concentré

Marion Luu <sup>\*† 1</sup>, Bastien Sanglard <sup>2</sup>, Bertrand Huneau <sup>3</sup>, Sébastien Lachaize <sup>4</sup>, Julian Carrey <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (LPCNO) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA) - Toulouse – 135 avenue de Rangueil, 31077 TOULOUSE CEDEX 4, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (LPCNO) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA) - Toulouse – 135 avenue de Rangueil, 31077 TOULOUSE CEDEX 4, France

<sup>3</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) – Ecole Centrale de Nantes, CNRS : UMR6183 – 1, rue de la Noë BP92101 44321 Nantes cedex 3, France

<sup>4</sup> Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (LPCNO) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA) - Toulouse – 135 avenue de Rangueil, 31077 TOULOUSE CEDEX 4, France

<sup>5</sup> Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (LPCNO) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA) - Toulouse – 135 avenue de Rangueil, 31077 TOULOUSE CEDEX 4, France

La sidérurgie est un secteur qui contribue à environ 7% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. La majeure partie de cet impact est due à l'utilisation de combustibles fossiles qui permettent de réduire les oxydes de fer en fer mais aussi d'apporter la chaleur nécessaire à la réaction. Dans ce contexte, nous cherchons à étudier des procédés de production de fer, acier et fonte sous flux lumineux concentré, tout en utilisant des réducteurs décarbonés et/ou bio-sourcés. Nos expériences sont réalisées sur des boulettes d'oxyde de fer industrielles fournies par ArcelorMittal, dans un simulateur solaire équipé d'un réacteur à chauffage direct.

Nos premiers résultats ont concerné l'utilisation de dihydrogène comme agent réducteur (1). Les échantillons étaient placés plus bas que le foyer du simulateur solaire afin d'être illuminés de la façon la plus homogène possible : le flux lumineux était d'environ 100 W/cm<sup>2</sup>. Nous avons pu observer que la réaction progresse le long d'un front de réduction se déplaçant de la surface illuminée à celle à l'ombre. Ceci nous a amené à comparer différents protocoles comme le retournement progressif des boulettes ou l'utilisation de disques fins découpés dans celles-ci. Dans ce dernier cas, nous avons pu obtenir près de 96% de rendement en seulement 2 min.

Dans un second temps, nous avons utilisé l'ammoniac à la place de l'hydrogène, en nous plaçant dans des conditions expérimentales comparables (2). Nous avons ainsi pu obtenir des degrés de réduction supérieurs à 95% pour des pellets retournés ou des disques. Nous avons aussi pu observer des temps de réduction plus longs pour l'ammoniac, en partie suite à la formation de nitrures de fer qui nécessitent des températures plus hautes pour être décomposés.

Enfin, nous nous sommes intéressés à la production d'acier. Notre objectif final serait de parvenir à former des aciers en exposant de l'oxyde de fer et du carbone au flux lumineux en présence d'un autre réducteur. Nous avons tout d'abord réalisé une étude préliminaire consistant à mélanger des poudres de fer et de carbone et à les exposer au maximum de flux soit 360 W/cm<sup>2</sup>. Nous avons pu observer la formation de billes métalliques liquides sous flux lumineux. Les échantillons produits ont été observés en microscopie optique et électronique à balayage et caractérisés via des

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: luu@insa-toulouse.fr

mesures de dureté. Nous avons ainsi pu déterminer les phases et constituants en présence et conclure à la formation d'aciers. L'analyse quantitative de nos micrographies optiques nous a permis d'estimer la quantité de carbone incorporé dans les échantillons lors du procédé. Actuellement, nous travaillons à l'élaboration d'aciers via l'utilisation directe de minerai de fer et de carbone sous hydrogène afin de combiner les étapes de réduction et de carburation. Les résultats de ces expériences seront également présentés lors de la conférence.

Références :

- (1) B. Sanglard *et al.*, " Towards solar metallurgy: complete hydrogen reduction of iron ore pellets under a concentrated light flux ", *Sol. Energy*, Submitted.
- (2) M. Luu *et al.*, " Towards solar metallurgy: iron ore reduction by ammonia under concentrated light flux ", *Green Chem.*, Submitted.

**Mots-Clés:** Solaire à concentration, Métallurgie, Oxyde de fer, Hydrogène, Ammoniac, Acier

# Influence du rayonnement solaire dans une rue canyon sur le confort thermique estival des occupants.

Valentin Lahaye \* <sup>1</sup>, Marion Bonhomme <sup>2</sup>, Claire Oms <sup>3</sup>, Nicolas Duport <sup>4</sup>, Stéphane Ginestet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions – Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier – France

<sup>2</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions (LMDC) – Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse, Université Paul Sabatier - Toulouse III – INSA-UPS 135 Avenue de Ranguéil - 31077 TOULOUSE CEDEX, France

<sup>3</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université Paul Sabatier, Toulouse France – France

<sup>4</sup> Bassins - Réservoirs - Ressources - U2R UPJV-UNIL 7511 – Université de Picardie Jules Verne, UniLaSalle – France

Le confort thermique estival dans les villes européennes est une préoccupation grandissante face aux enjeux du dérèglement climatique, caractérisé par des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses (Smid et al. 2019). Le dernier rapport de la Cour des Comptes souligne que la stratégie de rénovation actuelle des bâtiments est principalement axée sur l'accroissement de l'efficacité énergétique durant la saison hivernale et délaisse souvent les stratégies d'atténuation des effets de la chaleur estivale (Cours des comptes 2024). Ces effets sont exacerbés par le phénomène d'îlot de chaleur urbain qui entraîne une élévation supplémentaire des températures locales, dont l'une des causes principales est le piégeage du rayonnement solaire entre les bâtiments (T.R. Oke 1982).

Pour limiter le risque de surchauffe, les solutions passives le plus souvent préconisées comprennent l'amélioration de l'isolation pour minimiser la conduction thermique à travers les parois, l'accroissement de l'inertie thermique pour absorber les pics de chaleur, et la réduction des charges externes par la mise en place de protections solaires et/ou de revêtements de façades de couleurs claires. Toutefois, le piégeage du rayonnement dans les rues des centres-villes nécessite une modélisation particulière des phénomènes radiatifs pour évaluer la pertinence de certaines de ces pistes de rénovations en zone urbaine, et de réduire ainsi la vulnérabilité de ces bâtiments face aux surchauffes estivales.

Nous proposons d'utiliser une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain (Bugeat 2020) couplée au solveur d'éléments finis Cast3m afin de modéliser en régime transitoire le problème thermique complet : conduction, convection, et rayonnement (Duport 2021). Nous évaluerons l'influence de dispositifs d'ombrages et des propriétés radiatives des revêtements de façade d'une rue canyon sur le confort thermique estival à l'intérieur d'appartements. Les résultats seront analysés à travers l'indicateur de confort PET (Température Physiologique de Confort).

Bugeat, Antoine. 2020. " Développement d'une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain ". Thèse de doctorat. Pau. <https://www.theses.fr/2020PAUU3032>

---

\*Intervenant

(19 novembre 2023).

Cours des comptes. 2024. " Le rapport public annuel 2024 | Cour des comptes ". <https://www.ccomptes.fr/fr/pu-rapport-public-annuel-2024> (18 avril 2024).

Duport, Nicolas. 2021. " Études thermiques urbaines à différentes échelles par éléments finis ". PhD thèse. Université de Pau et des Pays de l'Adour. <https://theses.hal.science/tel-03520505> (16 novembre 2023).

Smid, M., S. Russo, A. C. Costa, C. Granell, et E. Pebesma. 2019. " Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves ". *Urban Climate* 27: 388-402. doi:10.1016/j.uclim.2018.12.010.

T.R. Oke. 1982. " The energetic basis of the urban heat island ". doi:<https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.

**Mots-Clés:** confort d'été, rayonnement, surchauffe, modélisation spatiale

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

Guillaume Le Gall \* <sup>1</sup>, Martin Thebault <sup>1</sup>, Cyril Caliot <sup>2</sup>, Julien Ramousse <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Savoie Mont Blanc : UMR5271 / FRE3220 – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>2</sup> LMAP UPPA CNRS – CNRS : UMR5142 – France

The solar radiative flux, or equally sunlight, constitutes an abundant and endless natural resource, available worldwide. In a society where a substantial part of the global energy yield is being directly expended at the city scale, urban areas appear as serious candidates for the production of solar energy. Their intrinsic complexity yet makes it challenging. The high occurrence of diverse obstacles like buildings, vegetated elements and other urban infrastructures creates an aggregation of countless singular geometries with diverse morphological characteristics (e.g. shape, size, orientation and inclination) and material optical properties (e.g. specular and/or diffuse reflectivity, transmissivity). This inherently causes important disruptions to incident solar radiations, adding on their natural variability brought about by the site specificities and diurnal/seasonal cycles. The field of irradiance received by a specific urban region (e.g. façade, building, district) may thus rapidly become the result of complex miscellaneous interactions between many degrees of freedom. In the presence of such high-dimensional phenomena expanding across a wide range of spatial and temporal scales, specific methods can be used to appreciate their global dynamics. Especially, Principal Component Analysis (PCA) has been widely adopted and validated in this context. PCA indeed decomposes the covariance of fluctuations in the original multivariate signal, and come up with a new set of uncorrelated features being linear combinations of initial variables. Their corresponding modes of variation now define a new basis of orthonormal features for the original signal pointing in the direction of its main variations, i.e. capturing most energy in the dataset.

An approach is proposed here for analysing the variations in space and time of the solar resource within an urban context by means of PCA. A parametric investigation is conducted on a set of theoretical  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  urban districts, defined as homogeneous arrangements of cuboid-like buildings, with various typological indicators (Total Site Coverage, Global Aspect Ratio) and surface materials (Lambertian, highly-specular) at a typical mid-high latitude. For each configuration, the shortwave radiative flux density on the facets of the central building is modelled via backwards Monte-Carlo ray tracing over a full year and under clear sky conditions, with a 15 min timestep and 1 m spatial resolution. PCA is subsequently applied to the simulated radiative fields to extract dominant modes of variation.

First results validate energy-based orthogonal decompositions like PCA as efficient tools for characterising the variability distribution of multivariate phenomena in this context. The issued separate representation of space and time variables allows for their independent examination, helping the identification of district areas subjected to important spatial and temporal varia-

---

\*Intervenant

tions of the solar resource. Characteristic time scales are clearly represented across successive orders of decomposition. Information about the district morphology is also obtained, with the contribution of surrounding geometries being portrayed by specific spatial modes. Similar prevalent variables are further repetitively encountered across multiple evaluated surfaces, but at different modal ranks.

**Mots-Clés:** Principal Component Analysis, Orthogonal decomposition, Shortwave radiations, Spatiotemporal variability, Urban environment

# Modélisation dynamique et étude de sensibilité des dimensions d'un échangeur-stockeur thermique à base de matériaux à changement de phase

Diane Le Roux <sup>\*† 1</sup>, Sylvain Serra <sup>1</sup>, Sabine Sochard <sup>1</sup>, Ryad Bouzouidja <sup>2</sup>, Anas Maftah <sup>2</sup>, Alain Sempey <sup>2</sup>, José Luiz Lara Cruz <sup>1</sup>, Zakaria Aketouane <sup>3</sup>, Tessa Hubert <sup>3</sup>, Jean-Michel Reneaume <sup>1</sup>

<sup>1</sup> LaTEP, Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés, 64000 Pau, France – Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, Pau, France – France

<sup>2</sup> Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux – Arts et Métiers ParisTech, CNRS : UMR5295, Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

<sup>3</sup> NOBATEK/INEF 4, Bordeaux – NOBATEK/INEF 4 – France

Pour limiter l'augmentation de la température mondiale, il est crucial de réduire l'impact environnemental de la production et de la consommation d'énergie. Selon l'Agence internationale de l'énergie, le secteur du bâtiment est l'un des plus gros consommateurs d'énergie dans le monde. L'un des principaux défis pour atténuer l'impact environnemental des bâtiments est donc de substituer les combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelables.

Pour le déploiement des énergies renouvelables, le recours aux moyens de stockage, en particulier thermique, devient une nécessité. En effet, ces derniers compensent la variabilité des intermittences liées à l'emploi des énergies renouvelables. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux capables de stocker de grandes quantités d'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Ce changement de phase est réversible, ce qui permet de stocker et de libérer de l'énergie thermique à des températures relativement constantes. Comparés aux matériaux de stockage de chaleur sensible, les MCP présentent plusieurs avantages significatifs, notamment une densité de stockage de chaleur plus élevée sur une plage de température plus restreinte. Par conséquent, l'utilisation des MCP peut contribuer à réduire la taille des systèmes de stockage de chaleur, les rendant ainsi plus adaptés au secteur du bâtiment où l'encombrement est une contrainte technique majeure.

Le système de stockage à base de MCP envisagé est constitué d'un échangeur à plaques pouvant être chargé et déchargé simultanément. Basé sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie, le modèle dynamique développé est capable de décrire le comportement de cette batterie thermique en liant les variables d'état à ses paramètres de conception et de fonctionnement. L'objectif de ce travail est de réaliser une analyse de sensibilité pour déterminer les paramètres de conception idéaux du stockage à base de MCP, comme le nombre de plaques, l'espacement entre les plaques et le nombre de stockages mis en parallèle. Dans de futurs travaux, ce modèle sera utilisé pour optimiser de manière dynamique un système composé de capteurs thermiques non-vitrés (Batisol®), d'une pompe à chaleur réversible et de 4 batteries thermiques à base de MCP différents, pour produire simultanément du froid, du chauffage basse température et de l'eau chaude sanitaire.

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: diane.le-roux@univ-pau.fr

Ces travaux de recherche s'intègrent au projet MCPBat, et impliquent la collaboration de plusieurs laboratoires, le LaTEP de Pau et l'I2M de Bordeaux, et de l'Institut pour la Transition Énergétique (ITE) NOBATEK/INEF 4.

**Mots-Clés:** Stockage d'énergie thermique, Analyse paramétrique, Eau chaude sanitaire, Chauffage basse température, Climatisation

# Evaluation des prévisions météorologiques de rayonnement solaire pour la production d'énergie solaire

Marie-Adèle Magnaldo <sup>\*† 1</sup>, Quentin Libois<sup>‡ 1</sup>, Christine Lac<sup>§ 1</sup>, Sébastien Riette<sup>¶ 1</sup>

<sup>1</sup> Centre national de recherches météorologiques (CNRM) – Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, Centre National de la Recherche Scientifique, Météo-France – 42 avenue Gaspard Coriolis 31057 TOULOUSE, France

Prévoir la production d'énergie solaire constitue à la fois un enjeu pour faciliter son intégration dans le réseau électrique et assurer sa stabilité, et un défi du fait de sa grande variabilité spatio-temporelle et de sa forte dépendance aux conditions météorologiques. Dans ce contexte, les prévisions de rayonnement solaire à la surface (SWD) que peuvent fournir les modèles de prévision numérique du temps (PNT) jouent un rôle central.

Cependant, les performances des modèles de PNT en termes de rayonnement solaire n'ont été que rarement évaluées, et très rarement sur de grands domaines et de longues périodes. Pourtant, quantifier les performances des modèles de PNT est d'autant plus important qu'elles demeurent limitées. De plus, évaluer de manière détaillée les différentes sources d'erreurs des prévisions de SWD, qui sont multiples et complexes, est essentiel en vue d'améliorer les modèles. Ce travail répond à ces enjeux en deux temps. Tout d'abord en développant une méthodologie d'évaluation des performances des modèles de PNT à résolution kilométrique pour le SWD, qui est appliquée au modèle opérationnel de Météo-France AROME, pour le SWD, sur tout le domaine de la France métropolitaine ainsi que sur un site hautement instrumenté, pour l'année 2020. Ensuite en proposant des pistes d'amélioration du modèle AROME.

Plus précisément, les prévisions horaires d'AROME sur la France métropolitaine sont évaluées à partir de mesures in situ de SWD provenant du réseau de 168 pyranomètres de Météo-France. Des produits nuageux dérivés d'observations de satellites géostationnaires permettent par ailleurs de classifier les situations nuageuses à haute fréquence et sur tout le territoire. L'analyse de ces observations montre que les situations contribuant le plus aux erreurs de SWD correspondent aux ciels nuageux dans le modèle et dans les observations. Ces situations sont très fréquentes et associées à un biais annuel positif marqué. Les situations de nuages manqués et de nuages prévus à tort sont relativement rares, donc peu impactantes, tandis que le biais en ciel clair bien prévu est faible. Le biais positif en conditions nuageuses semble être principalement lié à des erreurs d'épaisseur optique. Des erreurs de fraction nuageuse ne sont pas à exclure, mais sont difficiles à évaluer. Pour les ciels couverts dans le modèle, les nuages hauts sont associés à un biais positif de SWD tandis que les nuages de couche limite sont associés à un biais négatif. Une analyse détaillée sur le site du SIRTA, où sont également disponibles des observations de fraction nuageuse et de contenu en eau liquide, permet d'aller plus loin dans l'analyse des sources

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: marieadele.magnaldo@gmail.com

‡Auteur correspondant: quentin.libois@meteo.fr

§Auteur correspondant: christine.lac@meteo.fr

¶Auteur correspondant: sebastien.riette@meteo.fr

d'erreurs dans les modèles de PNT. Partant de ces différents constats, de nouvelles simulations AROME ont été produites sur deux mois, incluant des modifications des schémas radiatif et microphysique, dans le but d'améliorer les performances du modèle. Il conviendra d'approfondir ces différentes pistes lors de futurs travaux, dans l'objectif d'obtenir une version d'AROME optimisée pour la prévision de production d'énergie solaire.

**Mots-Clés:** prévisions météorologiques, rayonnement solaire, modèle de prévision numérique du temps, évaluation

# REVÊTEMENTS À SÉLECTIVITÉ SPECTRALE POUR L'HYBRIDATION SOLAIRE PV/CST

Amine Mahammou \* <sup>1,2</sup>, Antoine Grosjean <sup>3</sup>, Sébastien Quoizola <sup>1,2</sup>,  
Béatrice Plujat <sup>1,2</sup>, Laurent Thomas <sup>1,2</sup>, Audrey Soum-Glaude<sup>†</sup> <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

<sup>2</sup> Université de Perpignan Via Domitia – Université de Perpignan Via Domitia – France

<sup>3</sup> EPF Ecole d'ingénieur-e-s – EPF, 21bis boulevard Berthelot, Montpellier, France – France

Le changement dans les politiques énergétiques à travers le monde a conduit à une augmentation considérable de la part des sources d'énergie renouvelable dans le mix énergétique. L'hybridation photovoltaïque et solaire thermique à concentration (PV/CST) est une technologie émergente dans le domaine de la conversion de l'énergie solaire. Elle se révèle comme une solution prometteuse en raison de sa production simultanée d'électricité et de chaleur pour l'industrie ou le bâtiment via une utilisation optimisée du spectre solaire. Dans le cadre du projet SelHySol (2022-2025, Région Occitanie/UPVD), l'approche de couplage PV/CST retenue à PROMES est de type " compact " et implique le développement de récepteurs solaires hybrides intégrant des cellules PV montées sur les concentrateurs, et des absorbeurs thermiques CST placés à leur foyer. Cette étude se focalise sur le développement de deux solutions multicouches complexes à sélectivité spectrale, afin d'assurer de bonnes performances optiques pour les systèmes hybrides PV/CST compacts.

Dans le design proposé, un premier revêtement multinanocouche de type miroir sélectif serait déposé sur le verre de protection des cellules PV. Il transmet vers la cellule PV la partie du spectre solaire où celle-ci est efficace. Il agit comme miroir pour la partie restante du spectre, redirigeant ainsi le flux solaire non transmis à la cellule vers un récepteur thermique réoptimisé pour absorber ce spectre tronqué. Pour ce faire, le récepteur CST serait revêtu d'un multicouche de type absorbeur sélectif nanocomposite métal-céramique.

Le miroir sélectif proposé est composé d'un empilement aperiodique de deux matériaux d'indices optiques différents ( $\text{TiO}_2 - (n_{600 \text{ nm}}) = 2,58$  et  $\text{SiO}_2 - (n_{600 \text{ nm}}) = 1,47$ ), transparents dans le visible et le proche IR, chimiquement stables dans le temps, non toxiques et peu coûteux. Pour le revêtement absorbeur thermique, les multinanocouches ou composites métal-céramique sont de type W-SiC:H, savoir-faire du laboratoire (projets ANR ASTORIX et NANOPLAST, Région PLASMECO). Ces deux revêtements complémentaires sont développés via des procédés plasmas (respectivement PVD Radio-Fréquence et PVD réactive RF assistée par micro-ondes).

Dans notre démarche l'optimisation de l'efficacité énergétique du système hybride passe par différentes étapes. Tout d'abord, une étape de simulation (logiciel SolPOC : Solar Performance Optimization Code) en collaboration avec l'EPF-Montpellier permet d'identifier les épaisseurs

---

\*Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: Audrey.Soum-Glaude@promes.cnrs.fr

optimales des empilements multicouches, afin de maximiser les performances optiques. En particulier, les performances optiques théoriques d'empilements aperiodiques TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> ont été analysées et leur sensibilité à diverses variables (ordre d'empilement, nombre de couches, position de la fenêtre de transmission) sera présentée. On montrera aussi que l'ajout d'une couche mince d'argent dans ces structures peut diminuer l'épaisseur totale nécessaire. L'impact de l'angle d'incidence du flux solaire sur les performances a également été étudié.

Les couches constitutives des empilements ont été déposées par procédés plasma et caractérisées, afin que des empilements réels optimaux soient proposés par simulation puis élaborés. Ces empilements ont ensuite été caractérisés optiquement par spectrophotométrie. Ces résultats seront présentés pour démontrer la faisabilité des miroirs sélectifs.

**Mots-Clés:** Mots, clés : miroir sélectif, hybridation PV/CST compacte, multianocouches, performances optiques

# Analyse numérique du flux radiatif absorbé par un piéton dans une rue canyon en période de vague de chaleur

Hugo Matry<sup>\* 1</sup>, Marion Bonhomme<sup>† 1</sup>, Matthieu Labat<sup>‡ 1</sup>, Stéphane Ginestet<sup>§ 1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions (LMDC) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA) - Toulouse, Université Paul Sabatier-Toulouse III - UPS – INSA-UPS 135 Avenue de Rangueil - 31077 TOULOUSE CEDEX, France

À mesure que les villes voient leur population croître, l'impact du phénomène d'Ilot de Chaleur Urbain (ICU), exacerbé par le réchauffement climatique, suscite un intérêt grandissant. Une solution bien connue permettant d'atténuer les températures de surface est l'augmentation de l'albédo (proportion du rayonnement solaire réfléchi) des différentes surfaces de la rue. Bien qu'elle soit considérée comme efficace pour réduire les ICU, cette stratégie a un effet paradoxal : en réfléchissant une partie du rayonnement solaire des parois de la rue vers le piéton, elle peut affecter son confort thermique.

Un modèle numérique de microclimat urbain à l'échelle de la rue est en cours de développement sur COMSOL Multiphysics® 6.1. Ce modèle inclut un calcul radiatif du rayonnement solaire sur une rue canyon en 3D, ainsi qu'un bilan thermique en 2D prenant en compte le rayonnement solaire et ambiant, le flux conductif dans les parois et les transferts convectifs à la surface.

Les flux radiatifs absorbés provenant de plusieurs contributions (rayonnement solaire direct, solaire réfléchi, ambiant émis par les surfaces etc...) sont calculés sur un piéton au centre de la rue canyon en 3D. Il en découle ensuite le calcul de la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ) du piéton. Cette température, qui représente les échanges radiatifs entre un corps humain et un environnement donné, est l'un des paramètres influençant le plus le confort thermique du piéton en extérieur. Enfin, l'influence de l'albédo du sol et des murs et du rapport d'aspect de la rue sont étudiés.

L'augmentation de l'albédo dans la rue entraîne une augmentation du rayonnement solaire réfléchi sur le piéton. Cependant, cette augmentation permet également de réduire la température de surface des parois, et donc de limiter le rayonnement ambiant de la rue sur le piéton. Cette étude vise à quantifier ces deux contributions radiatives dans le calcul de la  $T_{mrt}$ , en simulant plusieurs jours d'été pendant une vague de chaleur.

**Mots-Clés:** Microclimat urbain, albédo, simulation numérique, température moyenne radiante

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: mbonhomme@insa-toulouse.fr

‡Auteur correspondant: m\_labat@insa-toulouse.fr

§Auteur correspondant: stephane.ginestet@insa-toulouse.fr

# Modélisation du productible énergétique annuel de centrale solaire hybride PV-CSP

Zacharie Menard <sup>\*† 1,2</sup>, Mouna Elhafi <sup>1</sup>, Simon Eibner <sup>1</sup>, Rodolphe Vaillon <sup>3</sup>, Alexis Vossier <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement (RAPSODEE) – UMR CNRS 5302 – Campus Jarlard 81013 Albi Cedex 9, France

<sup>2</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – CNRS : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-Romeu, France

<sup>3</sup> Équipe Photonique (LAAS-PHOTO) – LAAS, UPR8001, CNRS – France

Les centrales hybrides PV-CSP se définissent par la coopération de sous-systèmes photovoltaïques (PV) et thermodynamiques (CSP) pour convertir une même source d'énergie, afin d'améliorer l'efficacité de conversion et d'accroître la pilotabilité de la production électrique. Dans l'objectif d'évaluer la valeur ajoutée en terme de productible énergétique, nous étudions une centrale hybride PV-CSP utilisant un collecteur cylindro-parabolique ainsi que les sous-systèmes fonctionnant de manière autonome, notamment un système PV à suivi un axe, un système PV à concentration et un système CSP.

Les centrales étudiées dépendent de plusieurs paramètres opératoires que sont la concentration géométrique, la température de fonctionnement et le niveau d'énergie de la bande interdite des cellules PV ainsi que la température cible du fluide caloporteur du système CSP. L'objectif de l'étude est de construire un modèle physique permettant de déterminer le productible énergétique annuel de ces centrales, puis d'identifier les conditions opératoires telles que les performances des centrales hybrides surpassent celles des centrales autonomes.

En utilisant les données météorologiques d'Odeillo (dans les Pyrénées Orientales) et d'Atacama (région désertique du Chili), deux sites aux ressources solaires très différentes sont considérés. En particulier, la géométrie retenue est celle du collecteur Eurotrough, sur laquelle nous étudions la possibilité de positionner des cellules PV sur le réflecteur (architecture nommée PV Mirror) ou sur le récepteur (architecture nommée PV Topping).

À partir des données météorologiques et de la position du soleil, nous déterminons les irradiances des rayonnements directs et diffus et leurs distributions spectrales, ainsi que les différentes pertes dues à la géométrie du collecteur. Ces calculs du rayonnement sont ensuite couplés à un modèle empirique de l'absorbeur du CSP et au modèle de bilan détaillé en limite radiative des cellules PV.

Dans ce contexte, une large gamme de valeurs des paramètres principaux définis précédemment a été identifiée comme permettant une production énergétique supérieure à celle d'une centrale autonome similaire. Par rapport à une installation CSP, l'architecture PV Mirror amène à une augmentation du productible de 21% à Odeillo mais de seulement 9% à Atacama. Pour les deux emplacements étudiés, le PV Topping est l'architecture la plus performante avec une augmentation du productible relative à celle du CSP autonome de 29% et 26% aux emplacements d'Odeillo et d'Atacama respectivement.

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: zacharie.menard@univ-perp.fr

De futurs travaux auront notamment pour objectif d'adopter une autre approche temporelle afin d'éviter des effets de transition jour-nuit. De même, la prise en compte de la dépendance spectrale des propriétés radiatives des différents éléments optiques, et donc dans la thermique de l'absorbeur, est un objectif majeur pour l'amélioration de cette modélisation.

**Mots-Clés:** Hybride PV, CSP, Modélisation, Concentrateur Cylindroparabolique, Productible énergétique

# Investigating the Thermal Behavior of Materials with Highly Reflective Polymeric Coatings under Solar Radiation: A Molecular Dynamics Simulation Approach

Hiba Mhiri <sup>\*† 1</sup>, Anna Lushnikova <sup>\*</sup>

<sup>1</sup>, Christophe Menezo <sup>\*</sup>

1

<sup>1</sup> Université Savoie Mont Blanc – LOCIE, Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR5271, F- 73376 Le Bourget du Lac, France – 73376 Cedex, Boulevard du Lac, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

Understanding the thermal behavior of materials under solar radiation is crucial for various applications, including solar energy harvesting, thermal management systems as well as the development of urban media coating to mitigate the effects of urban heat islands. In this study, we investigate the thermal behavior of a material coated with a highly reflective polymeric coating containing BaSO<sub>4</sub> particles dispersed in a P(VdF-HFP) matrix using molecular dynamics (MD) simulation techniques. The MD simulations were performed using the LAMMPS software package, enabling us to model the interactions between atoms at the nanoscale level. Additionally, we used OVITO for visualization and analysis of the simulation results.

Our investigation focuses on elucidating how the incorporation of BaSO<sub>4</sub> particles into the polymeric matrix affects the thermal conductivity, heat transfer, and overall thermal performance of the material when exposed to solar radiation. By systematically varying parameters such as particle concentration and solar radiation intensity, we elucidate the underlying mechanisms governing the thermal behavior of the composite material.

Through our simulations, we provide insights into the role of the polymeric coating in enhancing the material's reflectivity and thermal insulation properties, thereby mitigating the adverse effects of solar heating. Additionally, we analyze the impact of particle dispersion on the material's thermal conductivity and explore strategies for optimizing the design of reflective coatings for improved thermal management in solar-driven applications.

This study contributes to the fundamental understanding of how materials respond to solar radiation and offers valuable insights for the development of next-generation solar energy systems, thermal barrier coatings, and other advanced materials for high-temperature environments.

**Mots-Clés:** Thermal behavior, Molecular dynamics simulation, Highly reflective polymeric coating, BaSO<sub>4</sub> particles, Solar radiation, Thermal conductivity.

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: hiba.mhiri@univ-savoie.fr

# Conversion et stockage de l'énergie solaire via les réactions photochimiques et catalytiques

Toussaint Ntambwe Kambuyi <sup>\*† 1</sup>, Carine Julcour <sup>‡ 2</sup>, Jean-François Blanco <sup>§ 3</sup>,  
Karine Loubière <sup>¶ 4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UT3, Toulouse, France – Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT – 4 Allée Emile Monso CS 84234 31432 Toulouse cedex 4, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UT3, Toulouse, France – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique (Toulouse) – 4 Allée Emile Monso CS 84234 31432 Toulouse cedex 4, France

<sup>3</sup> Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UT3, Toulouse, France – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique (Toulouse) – 4 Allée Emile Monso CS 84234 31432 Toulouse cedex 4, France

<sup>4</sup> Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UT3, Toulouse, France – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique (Toulouse) – 4 Allée Emile Monso CS 84234 31432 Toulouse cedex 4, France

Le stockage de l'énergie provenant des ressources renouvelables constitue le moyen le plus efficace pour palier au caractère intermittent de ces ressources et assurer une utilisation efficace de l'énergie. Une option innovante de stockage de l'énergie solaire consiste à une conversion directe à l'échelle moléculaire de l'énergie transportée par les photons en énergie chimique. Le principe associé repose sur la propriété de molécules photo-commutables " A " à s'isomériser suite à l'absorption de l'énergie contenue dans les photons conduisant aux molécules " B " plus énergétiques. Le retour de " B " vers la configuration moléculaire initiale " A ", est obtenue généralement *via* des réactions catalytiques au cours desquelles l'énergie préalablement stockée sous forme chimique est restituée via une production de chaleur. On parle de systèmes " MOST " (*MOlecular Solar Thermal energy storage*).

Parmi les systèmes MOST existant, le couple Norbornadiène (NBD)/Quadricyclane (QC) semble le plus prometteur notamment pour sa capacité de stockage élevée de l'ordre de 0.4 MJ/kg pour le 2-cyano-3-3-((4-méthoxyphényl)-norbornadiène noté NBD1. Cependant, malgré ses densités d'énergie élevées et sa robustesse, le NBD1 présente un très faible recouvrement avec le spectre d'émission solaire, conduisant à des valeurs d'efficacité de stockage de l'énergie solaire inférieures à 5%. En outre, la meilleure efficacité de stockage d'énergie est obtenue dans le toluène qui est un solvant toxique. En conséquence, la recherche de molécules ayant un large recouvrement avec le spectre d'émission solaire et de solvants alternatifs " vert " et assurant une bonne solubilité des NBD1 et QC1 apparaissent donc comme des enjeux majeurs, en particulier en vue d'une application domestique de ces systèmes.

Dans ce contexte, le projet ANR SOLPHOTOCAT, qui réunit 4 laboratoires français (LCC-Toulouse, PPSM-Saclay, PROMES-Perpignan, LGC-Toulouse), vise à développer et étudier de nouveaux systèmes MOST susceptibles de surmonter les limites du système NBD1/QC1 de

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: [toussaint.ntambwekambuyi@toulouse-inp.fr](mailto:toussaint.ntambwekambuyi@toulouse-inp.fr)

‡Auteur correspondant: [carine.julcour@toulouse-inp.fr](mailto:carine.julcour@toulouse-inp.fr)

§Auteur correspondant: [jeanfrancois.blanco@ensiacet.fr](mailto:jeanfrancois.blanco@ensiacet.fr)

¶Auteur correspondant: [karine.loubiere@cnrs.fr](mailto:karine.loubiere@cnrs.fr)

référence. Il s'agit : (i) de proposer des nouveaux systèmes chimiques, bon marché et respectueux de l'environnement, pour le stockage et la restitution sur demande de l'énergie solaire; et (ii) de développer les dispositifs milli-fluidiques continus capables d'évaluer rapidement leurs performances au sein d'un système intégré de stockage et conversion de l'énergie solaire.

Le couple NBD1/QC1 est dans un premier temps pris comme référence et la cinétique de la réaction photochimique (NBD1→QC1) est étudiée dans le cyclopentyl méthyl éther ( $T_{éb} = 106^{\circ}\text{C}$ ), un solvant polaire aprotique non toxique en utilisant un pilote milli-fluidique constitué d'un réacteur continu de type capillaire ( $\varnothing_{in} = 1,0 \text{ mm}$ ) enroulé en spirale, alimenté par un pousse-seringue et éclairé par un panneau comprenant 9 LEDs à 365 nm, chacune possédant une puissance radiante de 325 mW. La spectroscopie UV-visible est utilisée pour mesurer l'absorbance du NBD1 à 324 nm. Pour une absorbance initiale du NBD1 de 1,3974, la conversion du NBD1 est étudiée en fonction du temps de séjour hydraulique ( $\tau$ ) et de la quantité de photons. La conversion totale du NBD1 est obtenue à  $\tau = 15 \text{ min}$  pour la plus forte irradiation. Un modèle idéal de photo-réacteur (écoulement piston, densité de flux de photons uniforme et une seule espèce absorbante) permet de reproduire les tendances observées.

**Mots-Clés:** énergie solaire, stockage, systèmes MOST, photochimie, catalyse, pilote millifluidique, modélisation

# Evaluating World Urban Database, Access Portal Tools and Copernicus Global Land Service for Urban Meteorological Simulations: A Case Study in Lyon

Hamza Nisar <sup>\*† 1</sup>, Christophe Menezo<sup>‡ 1</sup>, Santamouris Mattheos<sup>§ 2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) – CNRS : UMR5271, Université de Savoie – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>2</sup> Anita B. Lawrence Centre (a) – School of Built Environment Anita B Lawrence Centre, West Entrance Kensington Campus Sydney, NSW 2052, Australie

Urban areas represent complex environments where land use and land cover characteristics play a significant role in influencing local meteorological conditions. This study focus on assessing the performance of two land use datasets, Wudapat\_Local Climate zones (LCZ) and CGLC\_LCZ, within the Weather Research and Forecasting (WRF) model framework for urban meteorological simulations, with Lyon as the representative study area.

The study aims to provide insights into the strengths and limitations of using Wudapat and CGLC\_LCZ land use datasets in the WRF model for urban meteorological simulations. By identifying areas of improvement and providing guidance on dataset selection, this study contributes to enhancing the accuracy and reliability of atmospheric modeling in urban areas.

The evaluation is conducted through a comprehensive analysis that integrates observational data and performance metrics, primarily focusing on the root mean square error (RMSE). The study aims to provide insights into the accuracy and reliability of the WRF model when using these datasets, particularly in representing meteorological variables crucial for urban environments, such as temperature, humidity and wind speed.

Furthermore, the outcomes of this research have broader implications for understanding the impacts of land use on urban microclimates and environmental conditions. Specifically, they provide a foundation for studying the potential effects of land use changes, such as the implementation of solar panels, on urban energy budgets and surface-atmosphere interactions in Lyon and similar urban environments.

**Mots-Clés:** WRF model, Land use datasets, Urban climate modeling, Local climate zone

---

\*Intervenant

† Auteur correspondant: Hamza.Nisar@etu.univ-savoie.fr

‡ Auteur correspondant: christophe.menezo@univ-smb.fr

§ Auteur correspondant: m.santamouris@unsw.edu.au

# Solar Performance Indicators and Retrofitting of a Rural School in France

Mona Noroozi <sup>\*† 1,2</sup>, Ali Derai<sup>‡ 1,2</sup>, Monika Woloszyn<sup>§ 1,2</sup>, Amandine Piot<sup>¶ 2,3</sup>, Lamia Berrah<sup>|| 2,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire proCédés énergie bâtimEnt (LOCIE) – University of Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>2</sup> Univ. Savoie Mont Blanc, Solar Academy Graduate School, LOCIE – University of Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>3</sup> Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives – INES, 73375 Le Bourget du Lac, France, France

<sup>4</sup> Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC) – Université Savoie Mont Blanc – BP 80439 74944 ANNECY LE VIEUX Cedex, France

Buildings are major global energy consumers, emphasizing the need to minimize their energy use. Many buildings with low energy efficiency, were constructed before energy regulations. This study focuses on assessing the energy efficiency of a school in Le Grand-Bornand, located in the French Alps. To do this, we use innovative indicators alongside traditional ones. These new indicators take into account the environmental energy resources available around the building, especially solar energy. Solar energy can be captured passively, as solar gains, and actively, through photovoltaic panels. Simulation software (DesignBuilder with EnergyPlus) were used to calculate performance indicators for three different retrofitting strategies involving the building's envelope and HVAC system.

**Mots-Clés:** solar performance indicators, passive retrofitting strategies

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: Mona.Noroozi@etu.univ-savoie.fr

‡Auteur correspondant: ali.derai@univ-smb.fr

§Auteur correspondant: monika.woloszyn@univ-smb.fr

¶Auteur correspondant: Amandine.PIOT@cea.fr

||Auteur correspondant: lamia.berah@univ-smb.fr

# Advancements in Tomographic Background Oriented Schlieren (Tomo-BOS) for Thermal Plume Characterization: Application for Solar Components to Urban Dynamics Analysis.

Ibrahim Osman <sup>\*† 1,2</sup>, Martin Thebault <sup>3</sup>, David Cloet <sup>4</sup>, Christophe Menezo <sup>5</sup>

<sup>1</sup> LabOratoire proCédés énergie bâtimEnt (LOCIE) – University of Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>2</sup> Polytech Annecy-Chambéry (EPU [Ecole Polytechnique Universitaire de l'Université de Savoie]) – University of Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac – Polytech Annecy-Chambéry - Campus Scientifique - Bâtiment La Chartreuse - 73376 LE BOURGET-DU-LAC Polytech Annecy-Chambéry - 5 chemin de Bellevue - BP 80439 - 74944 ANNECY LE VIEUX Cedex, France

<sup>3</sup> LabOratoire proCédés énergies bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>4</sup> LabOratoire proCédés énergies bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR 5271 – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX - France, France

<sup>5</sup> LabOratoire proCédés énergies bâtimEnt (LOCIE) – CNRS : UMR5271, University Savoie Mont-Blanc - CNRS, Le Bourget-Du-Lac, France – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

Tomographic Background Oriented Schlieren (Tomo-BOS) stands as a pioneering optical measurement technique, offering profound insights into density gradients and temperature distributions within transparent media. The experimental setup for Tomographic BOS measurements consists of six cameras with camera lenses, a background pattern, and the object of interest (Schlieren object) placed approximately in the center between the cameras and the background pattern. The cameras are focused onto the background dot-pattern or slightly towards the object of interest to ensure well-resolved dots of the pattern. Adjustments in the distance between the camera and the background pattern enable fine-tuning of the field of view and magnification of the image on the camera sensor, with a recommended dot size to be on the order of 3-5 pixels. The project primary focus is to explore Tomo-BOS applications, with a significant experiment centered on reconstructing the temperature profile of a Peltier module (thermoelectric module). This endeavor serves as a pivotal stepping stone towards investigating the temperature distribution around photovoltaic (PV) systems, studying the behavior of thermal plumes on a very small-scale district to urban canyons; aligning with the broader objective of advancing our understanding of energy generation and environmental sustainability through Tomo-BOS analysis. Moreover, Tomo-BOS extends its reach to medical imaging, material science, space exploration, environmental sciences and urban dynamics analysis. As an example, by visualizing temperature gradients and airflow patterns, Tomo-BOS aids in understanding complex phenomena such as air quality, atmospheric dynamics, and urban heat islands. This project at LOCIE Laboratory provides a unique opportunity for hands-on experimentation and collaboration, enabling the exploration of Tomo-BOS methodology and its practical applications.

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: Ibrahim.Osman@etu.univ-savoie.fr

**Mots-Clés:** Tomo, BOS, Transparent media, density gradient, temperature distribution, Peltier module, Background pattern, PV systems, Urban canyon, and Urban dynamic.

# RESEARCH ON ADVANCED ABSORPTION CHILLERS BASED ON GENERATOR-ABSORBER HEAT-EXCHANGE CYCLE POWERED BY SOLAR HEAT

Van Kha Pham \* <sup>1,2</sup>, Nolwenn Le Pierrès <sup>2</sup>, Hai Trieu Phan<sup>† 1</sup>

<sup>1</sup> CEA, LITEN – Université Grenoble Alpes – Campus INES, 73375 Le Bourget du Lac, France

<sup>2</sup> Laboratoire procédés énergie bâtiment (LOCIE) – CNRS, Université Savoie Mont Blanc – Bâtiment Helios, 60 rue du lac Léman, Savoie Technolac, 73370 Le Bourget du Lac, France

The amount of electricity consumed for cooling accounts already for a significant proportion and is expected to quickly increase in the near future. Therefore, it is necessary to develop alternative technologies for cooling such as absorption chillers in order to reduce electricity consumption by using heat from renewable energy sources, especially solar energy. In these equipments, a "thermal compressor" using solar heat obtained from solar collectors and very little electricity for a pump will replace the conventional compressor which consumes a lot of electrical energy. Besides, absorption machines also use environmentally friendly refrigerants such as ammonia or water. The scope of this work is to carry out research on ammonia-water absorption systems based on a Generator-Absorber Heat-Exchange (GAX) cycle. GAX effect in these cycles allows a part of the heat rejected by the absorption process to be recovered to generate the refrigerant vapor, thereby reducing the required heat from the external heat source supplied at the generator, and thus improving the performance of the machine. In this study, an overview of studies on the GAX cycle has been conducted. All the typical configurations such as standard GAX (SGAX), Hybrid GAX (HGAX), Branch GAX (BGAX) and other architecture of GAX are discussed. Results on thermodynamic performance influenced by operating conditions in experimental and numerical studies are also deeply analyzed. To go further, work is under progress to develop numerical models to simulate and analyze the operation of an existing GAX prototype for a better understanding of the occurrence of the GAX effect and its impact on the performance. In the future, deeper analysis about the impact of the component sizing or an integration of a compressor into the cycle and the technico-economic analysis of the GAX technology applied to some relevant applications will be also carried out.

**Mots-Clés:** Solar cooling, Absorption chiller, GAX cycle, Ammonia Water

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: Haitrieu.PHAN@cea.fr

# Transferts radiatifs dans les photoréacteurs : cas de milieux hétérogènes, avancées et limites actuelles.

Enrique Ribeiro \* <sup>1</sup>, Vincent Goetz <sup>1</sup>, Gael Plantard <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – Tecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

Les applications de photo-conversion comme le traitement de l'eau et la production d'hydrogène sont souvent basées sur la photocatalyse hétérogène en raison de son intérêt environnemental notamment relié à la possibilité d'une utilisation directe de l'énergie solaire. Cependant, le déploiement à grande échelle de cette technologie solaire est freiné par des problématiques de maintien du catalyseur solide dans le photoréacteur et d'autre part du fait des variations naturelles de densité de flux solaire journalière et saisonnière qui rend délicat le contrôle et le dimensionnement des photoréacteurs.

L'idée de fixer le catalyseur sur des supports tels que des mousses à porosité ouverte a émergé depuis plusieurs années pour répondre à la problématique de maintien de ce dernier dans le photoréacteur. Plus récemment, le développement de particules core-shell obtenues par dépôt du catalyseur sur des micro-billes de verre de faible masse volumique, a ouvert une autre option, la flottaison, pour le maintien du catalyseur dans le photoréacteur. En parallèle – pour pallier au verrou posé par la discontinuité de la ressource solaire – des matériaux capables de stocker les substances à photo-convertir pendant les périodes de faible ensoleillement ont été développés et associés avec succès à des catalyseurs (1). Ces solutions requièrent – du fait de la participation des photons au processus catalytique – de décrire le transport de rayonnement au sein du photoréacteur afin d'étudier les réactions de photo-conversions dont il est le siège (2,3).

Grâce aux travaux de Mie (1908), rendant possible le calcul de propriétés radiatives de particules sphériques, pléthore d'articles de la littérature scientifique ont traité de la problématique du rayonnement dans le cas de suspension de particules sphériques simples en résolvant l'équation de transfert radiatif par diverses méthodes. Cependant, il existe peu d'études du transfert radiatif en milieu hétérogène dans le cas de particules complexes (composites, core-shell,...) ou pour un catalyseur déposé sur un support de géométrie complexe (catalyseur supporté sur mousse).

Le but de ce travail est de montrer les avancées et limites en termes de description du transfert radiatif – utilisant la méthode de Monte Carlo – dans un photoréacteur plan pour différents milieux hétérogènes, allant du cas de particules sphériques simples au cas complexes évoqués en se focalisant sur des exemples incluant le TiO<sub>2</sub> comme catalyseur.

(1) Ribeiro E., Plantard G., Goetz V., 2021, "TiO<sub>2</sub> grafted Activated Carbon elaboration by milling: composition effect on sorption and photocatalytic properties", *J.Photochem.&Photobiol.A:Chem.* 408, 113108.

(2) Ribeiro E., Plantard G., Cornet J-F., Gros F., Caliot C., Goetz V., 2021, "Experimental and

---

\*Intervenant

theoretical coupled approaches for the analysis of radiative transfer in photoreactors containing particulate media: case study of TiO<sub>2</sub> powders for photocatalytic reactions”, Chem.Eng.Sci. 243, 116733.

(3) Goetz V.; Dezani C.; Ribeiro E.; Caliot C.; Plantard G.; "Continuous flow photocatalytic reactor using TiO<sub>2</sub>-coated foam, modeling and experimental operating mode" AIChE Journal, 2023, 69 (4),17972.

**Mots-Clés:** Transfert radiatif, photoréacteur, TiO<sub>2</sub>, photocatalyse, énergie, environnement

# Application of Ladybug Tool on Building Applied PV Reconfiguration under Partial Shading Condition

Chuanyong Shao \* <sup>1</sup>, Anne Migan-Dubois \* <sup>† 2</sup>, Demba Diallo \* <sup>‡ 1</sup>

<sup>1</sup> GROUP OF ELECTRICAL ENGINEERING OF PARIS – Supelec, UMR 8507 CNRS, UPMC, Univ. Paris-Sud – France

<sup>2</sup> GROUP OF ELECTRICAL ENGINEERING OF PARIS – Supelec, UMR 8507 CNRS, UPMC, Univ. Paris-Sud – France

Building an Applied PV system (BPV) provides a new solution to localized renewable energy in urban areas. For the BPV system, Partial Shading Condition (PSC) is the main reason for the power/energy loss mismatch. PV array topology expresses the effect of interconnection among PV modules on PV output performance under PSCs. Reconfiguring PV array topology helps to mitigate the power loss under the partial shading effect, raising the limits of the PV system's global output power. This technique contains two main types: traditional PV configuration and PV reconfiguring techniques. Traditional PV configuration refers to typical PV topology that prevents the Partial Shading Effect (PSE). The most mentioned traditional PV configurations in the previous work are Series-Parallel (SP), Bridge-Link (BL), Honey-Comb (HC), and Total-Cross-Tied (TCT). Two main types of PV reconfiguration methods are introduced: the Physical PV array reconfiguration (PAR) and the Electrical PV array reconfiguration (EAR). The PV reconfiguration technique changes the distribution pattern of PSCs by re-editing the wiring in real time or by determining the one-off physical location of the PV module.

The previous studies focus on static PSCs analysis rather than dynamic PSCs. Generally, static PSC cases are manually created, which may not be adapted to a real PSC case when building installed PV systems. Considering the costly utilization of sensors for detecting the shadow, we should explore simulation methods to visualize the effect of dynamic PSCs on BPV systems precisely.

Building Information Modeling (BIM) Technology provides the possibility to simulate the radiation distribution on a certain surface of the earth. Rhinoceros (Rhino) & Grasshopper (GH) and Ladybug (LB) Tool is a typical platform to simulate solar access on a building envelope.

This work proposes combining the BIM and the PV configuration techniques to better estimate the PV configurations' performance under real building-caused dynamic PSCs. This work aims to help the industry evaluate the capability of a BPV system more precisely during or after the design process.

The building model is built on Rhino/Grasshopper; the Ladybug (LB) Tool plugin in Grasshopper completes the irradiance analysis. The basic function of LB is to calculate the incident radiation during one period. To automatically collect the irradiance, a Python plugin is introduced to control the model's time slider; the resolution time interval is each hour.

---

\*Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: anne.dubois@centralesupelec.fr

<sup>‡</sup>Auteur correspondant: demba.diallo@centralesupelec.fr

Based on the above illustration, this work creates a dual-building community with Grasshopper, taking one as the objective building installed with a PV system on the rooftop. The irradiance attribution will finally be implanted in the PV topology models on SIMULINK, simulating the maximum power of the PV system each hour within one day. Furthermore, we compare the different performances among typical PV topologies of the BPV system through daily mismatch energy loss.

**Mots-Clés:** BPV system, BIM technology, Ladybug, Reconfigure PV array topology, Energy Loss.

# Experimental and Simulated Performance of a Solar Thermal System with Evacuated Tube Collectors Used for Agricultural Building Heating

Mehdi Salah <sup>\*† 1,2</sup>, Hervé Noel <sup>1</sup>, Anthony Magueresse <sup>1</sup>, Adrien Fuentes <sup>1</sup>,  
Liqun Feng <sup>2</sup>, Thibaut Colinart <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL) – Univ Bretagne Sud, IRDL – CNRS UMR 6027,  
F-56100 Lorient, France – Rue Saint-Maudé BP 9211656321 LORIENT cedex, France

<sup>2</sup> Feng Technologies (FENGTECH) – Département de la Mayenne – ZA du Riblay, 53260 Entrammes,  
France

Low temperature solar water heating systems (LT-SWHS) can contribute to GHG emissions reduction of buildings, industrial processes, or farming sector. For the later, field studies are rather scarce in the literature. This work focuses on the performance of a LT-SWHS with Evacuated Tube Collectors (ETC) that is used for space heating of juvenile animals rearing facilities located close to Nantes (Northwest of France). Originalities of this work are that the LT-SWHS is tested under mild climate with low irradiance and that it is coupled with real variable load profiles.

The set-up consists of 14 solar collector units (with a total absorber area of 42,3 m<sup>2</sup>, an inclination angle of 45° and an orientation 0° South), a 1000-liters vertical thermal storage tank (maintained at a temperature of at least 45 °C), a 55 kW-maximum-power backup auxiliary heating system (propane boiler) and heating floor and finned radiator (to maintain a temperature between 24 and 27 °C in the 283 m<sup>2</sup> rearing facility). The solar collector units are made with 30 Water-in-Glass (WiG) Evacuated Tube Collectors (ETC) connected to a 240-liters horizontal thermal storage tank. The later contains a 15m coiled heat exchanger (HEX), in which circulates a heat carrying fluid (HF), separately from the ETC fluid. The HEX of all solar collector units are assembled in series and supply heat in the vertical thermal storage tank. The set-up is equipped with 19 PT1000 temperature probes, 3 flowmeters and a weather station. All data is logged online from January 2024 with a time step of 5 minutes. These data are analyzed to assess the thermal behavior of the set-up, the energy balances and solar coverage levels. For instance, first results of Mars 2024 show a solar coverage of 20%.

A numerical model of the LT-SWHS is developed on TRNSYS 18, in which the natural thermosiphon flow in the collector units was modelled according to the equations of Budihardjo et al. (2007). Special attention is paid to the performance of the 14 solar collector units arranged in series. The numerical results obtained using measured weather data are compared to experimental data on short periods.

**Mots-Clés:** Solar Thermal, Space Heating, Evacuated Tube Collectors, Experimental Validation, TRNSYS, Simulation

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: mehdi.salah@univ-ubs.fr

# Couplage du modèle de canopée urbaine TEB avec le modèle radiatif SPARTACUS-Urban et évaluation de l'absorption solaire avec le modèle de référence HTRDR-Urban basé sur la méthode de Monte-Carlo

Robert Schoetter <sup>\*† 1</sup>, Cyril Caliot <sup>2</sup>, Robin Hogan <sup>3</sup>, Vincent Forest <sup>4</sup>,  
Vincent Eymet <sup>4</sup>, Valéry Masson <sup>5</sup>

<sup>1</sup> CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS – MétéoFrance – 42 avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, France

<sup>2</sup> CNRS, UPPA, E2S, LMAP – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], CNRS : UMR5142 – 1 Allée du Parc Montaury, Anglet, France, France

<sup>3</sup> ECMWF – Royaume-Uni

<sup>4</sup> Meso-Star SAS – PME – France

<sup>5</sup> CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS – MétéoFrance – 42 avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, France, France

Le transfert radiatif dans la géométrie 3-D urbaine est crucial pour l'îlot de chaleur urbain, la consommation énergétique des bâtiments et le confort thermique à l'extérieur. Les modèles de canopée urbaine calculent le transfert radiatif en simplifiant la morphologie urbaine (par exemple via une rue-canyon de longueur infinie représentative du quartier) et la physique du transfert radiatif. Les échanges radiatifs sont calculés via la méthode de la radiosité qui suppose du vide dans la canopée urbaine et des matériaux dont la réflectivité ne dépend pas de la longueur d'onde et de la direction (matériaux Lambertiens *broadband*). Ceci introduit des biais systématiques car par exemple la distribution des distances mur-mur et sol-mur des morphologies simplifiées est systématiquement différente de celle des vraies morphologies. Dans les modèles de canopée urbaine, il est aussi difficile à prendre en compte la variété des hauteurs des bâtiments et des processus physiques comme la réflexion spéculaire par les fenêtres, des matériaux dont la réflectivité dépend de la longueur d'onde et l'interaction du rayonnement avec l'air, les aérosols ou du brouillard dans la canopée urbaine. Le modèle radiatif SPARTACUS-Urban est basé sur une hypothèse plus réaliste de la morphologie urbaine (une décroissance exponentielle de la probabilité des distances mur-mur et sol-mur), et des arbres (des cylindres). Ce modèle résout l'équation du transfert radiatif avec la méthode des ordonnées discrètes ce qui permet de prendre en compte une morphologie urbaine plus complexe et les processus physiques mentionnés. Le modèle de canopée urbaine TEB est couplé avec SPARTACUS-Urban et le nouveau modèle TEB-SPARTACUS est disponible gratuitement et en open-source (<http://www.umr-cnrm.fr/surfex/spip.php?article387>). Les observables radiatives (comme le rayonnement solaire absorbé par les toits, les murs, le sol, ou la végétation) simulées par TEB-SPARTACUS sont évaluées pour des morphologies urbaines générées de manière procédurale représentant les *Local Climate Zones* (LCZ). Cette évaluation est faite via une comparaison avec le nouveau modèle de référence du transfert radiatif HTRDR-Urban basé sur la méthode de Monte-Carlo (distribué gratuitement et en open-source, [https://gitlab.com/edstar/htrdr/-/tree/main\\_urban](https://gitlab.com/edstar/htrdr/-/tree/main_urban)).

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: [robert.schoetter@meteo.fr](mailto:robert.schoetter@meteo.fr)

TEB-SPARTACUS améliore le bilan radiatif solaire et infrarouge terrestre pour toutes les LCZ. L'amélioration de la quantité de rayonnement solaire absorbée par les murs ou le sol peut atteindre 10 % du rayonnement solaire descendant. TEB-SPARTACUS pourrait donc améliorer les simulations de la consommation énergétique des bâtiments, du confort thermique à l'extérieur et de l'îlot de chaleur urbain. TEB-SPARTACUS simule aussi mieux l'influence des arbres sur le bilan radiatif urbain car il représente mieux les bords des arbres. Dans le cadre du déploiement de panneaux solaires dans les villes, TEB-SPARTACUS peut servir à mieux quantifier la densité de flux solaire incident sur les toits et les murs à l'échelle du quartier et ceci dans des simulations numériques de longues durée à l'échelle d'un pays ou d'un continent ou SURFEX-TEB est couplé à un modèle de climat régional. HTRDR-Urban peut servir comme modèle de référence pour quantifier la densité de flux solaire (spectral) incident sur un panneau solaire spécifique dans une géométrie urbaine 3D représentée avec un haut niveau de détail.

**Mots-Clés:** modèle de canopée urbaine, modèle de référence, TEB, Monte, Carlo, rayonnement absorbé par les villes

# Etude numérique et expérimentale d'un système de valorisation de l'énergie solaire thermiques des routes pour les besoins des bâtiments

Prince Sevi <sup>\*† 1</sup>, Benoit Stutz <sup>\*</sup>

<sup>1</sup>, Frédéric Bernardin <sup>\* ‡ 2</sup>, Alexandre Cuer <sup>\* § 3</sup>, Evelyne Toussaint <sup>\* ¶ 4</sup>,  
Thomas Attia <sup>\* || 5</sup>, Marc Palomares <sup>\* \*\* 6</sup>

<sup>1</sup> Université Savoie Mont-Blanc, LOCIE Laboratory, UMR 5271, CNRS – Université Savoie Mont Blanc – France

<sup>2</sup> CERMA centre est – Cerema Centre Est – France

<sup>3</sup> Cerema centre-est – CEREMA : centre-est, Cerema Centre Est – France

<sup>4</sup> Institut Pascal – Université Clermont Auvergne, CNRS – France

<sup>5</sup> EIFFAGE – Groupe Eiffage – France

<sup>6</sup> ELYDAN – elydan – France

La réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant des énergies fossiles combinée à l'augmentation de la demande mondiale en énergie représente un défi majeur pour l'humanité. Nous ne pourrions le résoudre sans un recours massif aux énergies renouvelables. L'énergie solaire est l'une des formes renouvelables les plus abondantes et disponibles. Diverses techniques sont utilisées pour exploiter cette énergie, telles que les panneaux solaires photovoltaïques pour la production d'électricité et les capteurs solaires thermiques pour la production de chaleur.

Récemment, une autre approche a émergé, celle des routes solaires, offrant à la fois des infrastructures de transport et des capacités de captation d'énergie solaire. Dans ce contexte, cette thèse propose l'étude et le développement d'un système couplant énergétiquement une chaussée à un bâtiment via un stockage thermique. Le concept repose sur la récupération de chaleur de la chaussée pendant les périodes chaudes, via un fluide caloporteur circulant dans un revêtement de chaussée drainant placé sous la couche de roulement. Cette chaleur est ensuite stockée au sein d'un stockage thermique composé de sable saturé en eau en sous-sol du bâtiment afin d'être mobilisée ultérieurement. Les capacités énergétiques du stockage sensible sont augmentés par l'englacement partiel du stockage au coeur de l'hivers sans impacter les performances du système. Le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire mettent en oeuvre une pompe à chaleur. Un modèle thermique et énergétique a été développé pour l'ensemble du système. Les prédictions du modèle sont comparées aux résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'un démonstrateur spécifiquement développé pour les besoins de l'étude.

Les simulations annuelles montrent qu'il est possible de chauffer efficacement des maisons individuelles ou des petits collectifs répondants aux réglementations énergétiques actuelles en val-

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: febron-lionel-prince.sevi@univ-smb.fr

‡Auteur correspondant: frederic.bernardin@cerema.fr

§Auteur correspondant: alexandre.cuer@cerema.fr

¶Auteur correspondant: evelyne.toussaint@uca.fr

||Auteur correspondant: thomas.attia@eiffage.com

\*\*Auteur correspondant: mpalomares@elydan.eu

orissant l'énergie thermique des routes avec un coefficient de performance moyen de la pompe à chaleur voisin de 6.5. Une étude de sensibilité du système a montré que la superficie du capteur, le volume du stockage et le lieu d'implantation ont une influence sur les performances du système.

**Mots-Clés:** échangeurs thermique routier, stockage sensible, stockage latent, chauffage des bâtiments

# Caractérisation thermique d'un béton de chanvre intégrant un matériau à changement de phase bio-sourcé

Hachmi Toifane <sup>1</sup>, Pierre Tittlein <sup>1</sup>, Anh Dung Tran Le\* <sup>2</sup>, Laurent Zalewski <sup>† 1</sup>, Thierry Chartier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE) - ULR 4515 (LGCgE) – Université d'Artois – Université d'Artois - Technoparc FUTURA - 62400 BETHUNE, France

<sup>2</sup> Laboratoire des technologies innovantes - UR UPJV 3899 (LTI) – UPJV Université Picardie Jules Verne – Université de Picardie Jules Verne - IUT d'Amiens - Avenue des Facultés - 80025 AMIENS CEDEX 1, France

Cette étude présente un matériau composite constitué de matériaux à changement de phase (MCP) biosourcés d'origine végétale associés à des particules de chanvre (chènevottes), développé en réponse aux défis environnementaux du secteur de la construction. L'état de l'art souligne la faible capacité de stockage thermique des matériaux biosourcés et la nécessité croissante de développer des matériaux durables offrant des performances thermiques, mécaniques, et hydriques intéressantes. L'association des propriétés thermiques du MCP ainsi que des propriétés hydriques des chènevottes, abouti à un matériau alliant légèreté, résistance, et régulation hygrothermique. Dans cette étude, nous nous intéresserons qu'à la partie thermique et notamment les capacités de stockage en fonction du taux de MCP intégré au béton de chanvre. Les échantillons chargés en MCP seront comparés au matériau de référence ne contenant pas de MCP. La caractérisation thermophysique des matériaux se fera par méthode inverse à partir de mesures de flux expérimentales et de flux simulés. Les résultats obtenus démontrent que l'ajout du MCP améliore significativement la capacité de stockage thermique du matériau, le positionnant ainsi comme une solution prometteuse pour la construction durable et pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

**Mots-Clés:** Béton de chanvre, Matériau à changement de phase (MCP) biosourcé, Stockage thermique, Stockage latent, Chènevottes

---

\*Auteur correspondant: anh.dung.tran.le@u-picardie.fr

<sup>†</sup>Intervenant

# Thermophotovoltaics for solar/power-to-heat-to-power energy conversion

Rodolphe Vaillon \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS (LAAS-CNRS) – LAAS, UPR8001, CNRS – France

Based on the photovoltaic effect to produce electricity from thermal radiation, thermophotovoltaics (TPV) has recently benefited from strong advances and new opportunities. This new momentum is linked to the development of solar-to-heat-to-power (usually called Solar TPV) converters and more recently of power-to-heat-to-power converters. In both cases, a key point is that energy can be efficiently stored under the form of heat, thus allowing to alleviate the intermittency of solar and wind power generation. The storage of latent or sensible heat at ultra-high temperature ( $> 1000$  °C), at high density and low cost (1), is the backbone of the advent of the so-called TPV "batteries" (2).

To start with, the presentation will provide the basic principles of thermophotovoltaics (3, 4). The differences of TPV conversion with respect to solar PV conversion will be described, by highlighting some advantages (tuning of the spectrum of the thermal radiation emitter, photon recycling toward the emitter, increased power density) and some drawbacks (primary energy conversion and heat losses). Then the most promising applications envisioned as part of the transition to carbon-free renewable electricity generation will be introduced. It will be explained how the concomitant development of low-cost thermal energy storage (1) and highly-efficient ( $> 40\%$ ) thermophotovoltaic cells (5) is currently accelerating research on power-to-heat-to-power and solar-to-heat-to-power TPV batteries. Then, an analysis of the state-of-the-art of TPV systems developed and characterized in the laboratory will be proposed. In particular, it will be shown that there is a relation between optimum operating temperature of the thermal radiation emitter and bandgap of the photovoltaic cell (6). Advanced concepts, research avenues and associated challenges will be briefly presented. The talk will conclude with an introduction to the TREE (thermal radiation to electrical energy conversion) project-team (7), supported by the "CNRS Ingénierie" institute, which brings together 20 French academic laboratories to advance collaborative research on this subject.

(1) A. Datas, Ultra high temperature thermal energy storage for dispatchable power generation, Encyclopedia of Energy Storage 2, 141-150, 2022.

(2) A. Datas et al., Latent heat thermophotovoltaic batteries, Joule 6, 418-443, 2022.

(3) T. Burger et al., Present efficiencies and future opportunities in thermophotovoltaics, Joule 4, 1660-1680, 2020.

(4) A. Datas & R. Vaillon, Thermophotovoltaic energy conversion, Chapter 11 in: Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion, Woodhead Publishing, 285-308, 2021.

---

\*Intervenant

(5) A. LaPotin et al., Thermophotovoltaic efficiency of 40%, Nature 604.7905, 287-291, 2022.

(6) B. Roux et al., Main performance metrics of thermophotovoltaic devices: analyzing the state of the art, J. Photonics for Energy 14, 042403, 2024.

(7) Project-team TREE: <https://tree.ies.umontpellier.fr>. Last access on 04/19/2024.

### **Acknowledgements**

Support from the "CNRS Ingénierie" institute (project-team TREE) is acknowledged.

**Mots-Clés:** solar to heat to power, power to heat to power, thermal storage, thermophotovoltaics, battery.

# Projet FlexTASE - Flexibilités des systèmes énergétiques avancés

Frédéric Wurtz\* <sup>1</sup>, Julien Ramousse† <sup>2</sup>, Christophe Menezo ‡§ <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELab) – Université Joseph Fourier - Grenoble 1, Institut Polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5269, Université Grenoble Alpes – France

<sup>2</sup> LabOratoire proCédés énerGies bâtimEnt (LOCIE) – University Savoie Mont-Blanc - CNRS, Le Bourget-Du-Lac, France – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>3</sup> LabOratoire proCédés énerGies bâtimEnt (LOCIE) – CNRS : UMR5271, University Savoie Mont-Blanc - CNRS, Le Bourget-Du-Lac, France – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

La flexibilité est un enjeu qui appelle des innovations techniques pour orchestrer une flexibilité entre production et consommation, face à l’intermittence des énergies renouvelables (soleil, vent ...), ou au risque de congestion ou aux limites des moyens de production disponibles, mais qui appelle aussi à des innovations sociales pour aller vers une implication/appropriation des acteurs de la chaîne énergétique, des gestionnaires, jusqu’aux consommateurs qui font partie du système énergétique et de sa dynamique de fonctionnement et de réaction.

Dès lors il devient indispensable de développer une nouvelle approche paradigmatique d’ordre technique et sociale pour de nouvelles questions scientifiques :

Quelle est la nature d’un système technico-social de production/consommation d’énergie adressant : La flexibilité indirecte (ou implicite) mobilisant les acteurs sur des solutions techniques et organisationnelles passant par l’envoi de signaux (tarifaire et non tarifaires). La flexibilité directe (ou explicite) passant par le pilotage de systèmes de production, de consommation, ou de stockage, dont la gestion est assurée directement par des algorithmes, des systèmes et des acteurs (type agrégateurs). Quelles nouvelles méthodes et approches à l’interface des sciences de l’ingénieur et des sciences humaines et sociales pour :

- observer, mesurer (quantitativement & qualitativement) les dynamiques de flexibilité, alimentée par une recherche participative,
- et être in fine en mesure de proposer de nouveaux outils de conception, de simulation, intégrant de nouveaux indicateurs.

Tout ceci pour en être en mesure de répondre à de nouvelles questions :

- Comment les solutions techniques permettent-elles de mobiliser les leviers d’appropriation

---

\*Auteur correspondant: frederic.wurtz@g2elab.grenoble-inp.fr

†Auteur correspondant: Julien.Ramousse@univ-savoie.fr

‡Intervenant

§Auteur correspondant: christophe.menezo@univ-smb.fr

et d'implication dans la chaîne de consommation et de production d'énergie.

- Comment la nécessaire prise en compte de l'"Humain dans la boucle" à titre individuel et collectif, rend nécessaire de revoir les méthodes de mesures, de caractérisation et d'innovations.

pour in fine aboutir à de nouvelles solutions techniques et de nouveaux outils de simulation et de conception s'appuyant sur de nouveaux indicateurs intégrant les nouveaux gisements de flexibilités de la production et de la consommation et les dimensions sociales (organisation, comportements, pratiques, modèles économiques).

Dans cet esprit, le consortium Flex-TASE, en réunissant principalement des sciences de l'ingénierie, mais aussi des SHS et des sciences économiques, est en mesure, avec une approche technico-sociale de la Flexibilité, de produire :

- des méthodes pour la caractérisation des réservoirs et des leviers de flexibilité directe (basés sur des systèmes techniques) et indirecte (passant par les acteurs et l'envoi de signaux)
- la construction d'indicateurs scientifiques quantitatifs et qualitatifs de caractérisation
- de nouvelles générations d'outils de calcul et de simulation pour la flexibilité interopérables entre les paradigmes de la simulation dynamique, de l'optimisation et de l'approche agent
- la mise au point d'une recherche sociotechnique sur des scènes de recherche de type living-lab et terrain, à l'interface des innovations techniques des usages et usagers.
- Le déploiement d'une plate-forme de type observatoire support à une dynamique de recherche sur la flexibilité pour accompagner une recherche de science participative et une approche de science ouverte.

**Mots-Clés:** Systèmes énergétiques mutlisources, Flexibilités directes et indirectes, Gestion de la demande, Approche technicosociale

# Caractérisation thermophysique d'un matériau à changement de phase (MCP) de type paraffine par méthode inverse et mesures de flux

Laurent Zalewski \* <sup>1</sup>, Gilles Fraisse <sup>2</sup>, Didier Defer \*

<sup>3</sup>, Thierry Chartier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France (LGCgE) – Université d'Artois – Université d'Artois - Technoparc FUTURA - 62400 BETHUNE, France

<sup>2</sup> LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Savoie Mont Blanc University, CNRS, Univ. Grenoble Alpes – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

<sup>3</sup> Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France (LGCgE) – Université d'Artois – Université d'Artois - Technoparc FUTURA - 62400 BETHUNE, France

L'identification des propriétés thermophysiques des MCP n'est pas aisée. Les propriétés thermophysiques à identifier sont nombreuses pour un matériau à changement de phase et nécessaires pour établir des modèles numériques qui seront capables de représenter le comportement thermique du MCP lorsqu'il sera intégré à un stockage thermique latent. Ces propriétés sont essentielles pour évaluer les transferts thermiques au sein du stockage, les dynamiques de stockage/déstockage, le dimensionnement des systèmes.

Ce sujet fait l'objet de travaux dans la tâche 67 "Compact Thermal Energy Storage Materials" du programme "Solar heating and cooling" de l'Agence Internationale de l'énergie.

Les méthodes expérimentales du hot disque ou du laser flash sont les plus souvent utilisées pour l'identification des conductivités thermiques du MCP et la DSC pour les capacités de stockage, la détermination de la chaleur latente et les températures de changement d'état. Ces méthodes directes sont menées de manière indépendante.

Notre approche est globale. C'est à dire qu'à partir d'un dispositif expérimental basé sur des mesures de flux et de températures associé à une méthode inverse, les propriétés thermophysiques sont identifiées et utilisées pour construire un modèle numérique qui pourra reproduire de manière fiable le comportement thermique du MCP lors des cycles de changement d'état (solide  $\leftrightarrow$  liquide).

Le MCP étudié est celui choisi pour l'étude du groupe de travail de l'IEA concernant la caractérisation de la conductivité thermique d'un MCP par différentes méthodes. Celui-ci est une paraffine RT53-58 (ASTM D 87) produite par la société Merck. Puisque le MCP peut se trouver en phase liquide, celui-ci doit être placé dans un contenant lors des mesures. Ceci nécessite ainsi de prendre en compte ce contenant lors de l'identification des propriétés thermophysiques du MCP sans oublier les résistances de contact. Lorsque le MCP se solidifie, il se contracte et laisse un vide dans le contenant. Quel est l'impact de ce vide sur les mesures et l'identification des propriétés thermophysiques ? Les valeurs de la conductivité thermique entre l'état solide et liquide sont très différentes et dépendent fortement de l'identification des résistances de contact

---

\*Intervenant

; cet état de fait introduit la question de sa non prise en compte dans les méthodes directes expérimentales. Cette différence peut également être due à la présence de convection dans le MCP à l'état liquide. D'autre part, comme le MCP n'est pas un matériau pur, le changement d'état se produit sur une plage de température étalée et montre plusieurs pics. Comment mettre en évidence ces phénomènes ? Les identifier ?

Voici les quelques questions auxquelles nous essaierons de répondre dans ce travail.

**Mots-Clés:** Matériau à changement de phase (MCP), Stockage latent, Mesures de flux, Caractérisation des propriétés thermophysiques, Méthode inverse

# Liste des auteurs

- Achchaq, Fouzia, 5  
Aketouane, Zakaria, 43  
AMIOT, Baptiste, 3  
Amiot, Baptiste, 10  
André, Frédéric, 6  
ATTIA, Thomas, 67
- Baltus, William, 30  
Barbosa, Séverine, 25  
Ben khalifa, Ghada, 9  
Bennacer, Rachid, 21  
Berlioux, Baptiste, 10  
BERNARDE, Damien, 7  
BERNARDIN, Frédéric, 67  
Berrah, Lamia, 56  
BLANCO, Jean-François, 53  
Blanco, Stéphane, 16  
Bonhomme, Marion, 23, 39, 49  
Bonzoms, Florian, 12  
boulet, nicolas, 28, 30  
Bourarach, Fadi Mehdi, 14  
Bouzouidja, Ryad, 43  
Brottier, Laetitia, 21
- CALIOT, Cyril, 6  
Caliot, Cyril, 16, 41, 65  
Carrey, Julian, 37  
Changizi, Farzaneh, 17  
CHARTIER, Thierry, 69, 74  
Cloet, David, 57  
Colinart, Thibaut, 64  
CUER, Alexandre, 67
- D'Alençon, Louis, 16  
Davari, Malihe, 19  
De PROMES, Personnel, 30  
Defer, Didier, 74  
Delachaux, Valentin, 21  
DERAI, ALI, 56  
DIALLO, Demba, 62  
Dirion, Jean-Louis, 7  
DUPORT, Nicolas, 39
- Eibner, Simon, 50  
Elhafi, Mouna, 50
- ESTAY, Lucas, 23  
Eymet, Vincent, 65
- Fasquelle, Thomas, 25, 26  
Faugeroux, Olivier, 12  
Feng, Liqun, 64  
Ferlay, Nicolas, 6  
Ferrand, Martin, 3, 10  
FITO, Jaume, 19  
Forest, Vincent, 16, 65  
Fournier, Richard, 16  
FRAISSE, Gilles, 74  
Fuentes, Adrien, 64
- Gibout, Stéphane, 14  
Ginestet, Stéphane, 23, 39, 49  
GIROUX-JULIEN, STEPHANIE, 3  
goetz, vincent, 60  
Grosjean, Antoine, 47  
GUILLET, Gabriel, 25  
Guillot, Emmanuel, 28, 30  
Guimbretiere, Guillaume, 33
- Haeussler, Anita, 30  
Hogan, Robin, 65  
Hourdin, Frédéric, 16  
Hubert, Tessa, 43  
Huneau, Bertrand, 37
- Julcour, Carine, 53
- Kadoch, Benjamin, 25  
Kafeh, Doha, 35  
Knikker, Ronnie, 10
- LABAT, Matthieu, 49  
Lac, Christine, 45  
Lachaize, Sébastien, 37  
Lahaye, Valentin, 39  
Lalau, Yasmine, 26  
Lara Cruz, José Luiz, 43  
Le Gall, Guillaume, 41  
Le Pierrès, Nolwenn, 59  
Le Roux, Diane, 43  
Legros, Philippe, 5

Libois, Quentin, 45  
 Loubière, Karine, 53  
 Lushnikova, Anna, 9, 52  
 LUU, Marion, 37  
  
 Maftah, Anas, 43  
 Magnaldo, Marie-Adèle, 45  
 Magueresse, Anthony, 64  
 Mahammou, Amine, 47  
 Masson, Valéry, 65  
 Matry, Hugo, 49  
 Mattheos, Santamouris, 55  
 Mazet, Nathalie, 35  
 Menard, Zacharie, 50  
 MENEZO, Christophe, 9, 17, 55, 57, 72  
 menezos, christophe, 52  
 MER, Samuel, 35  
 Mhiri, Hiba, 52  
 MIGAN-DUBOIS, Anne, 62  
 Milhe, Mathieu, 7  
  
 Neveu, Pierre, 35  
 Nisar, Hamza, 55  
 Noel, Hervé, 64  
 Noroozi, Mona, 56  
 NTAMBWE KAMBUYI, Toussaint, 53  
  
 Olivès, Régis, 35  
 Oms, Claire, 23, 39  
 Ordoñez, Freddy, 26  
 OSMAN, Ibrahim, 57  
  
 Pabiou, Hervé, 3, 10  
 Palomares, Marc, 67  
 Perez, Antoine, 30  
 Perier-Muzet, Maxime, 35  
 PHAM, Van Kha, 59  
 PHAN, Hai trieu, 59  
 Pillot, Benjamin, 33  
 Piot, Amandine, 56  
 Plantard, Gael, 60  
 Plujat, Béatrice, 47  
  
 Quoizola, Sébastien, 47  
  
 Ramousse, Julien, 19, 41, 72  
 Reneaume, Jean-Michel, 43  
 REOYO-PRATS, Reine, 12  
 Retailleau, Florent, 16  
 Ribeiro, Enrique, 60  
 Riette, Sébastien, 45  
 Rodriguez, Régis, 30  
 Rémi, Le Berre, 3, 10  
  
 Salah, Mehdi, 64  
 SANGLARD, Bastien, 37  
 Sans, Jean-Louis, 28, 30  
 Schoetter, robert, 16, 65  
 Sempey, Alain, 43  
 SERRA, Sylvain, 43  
 Sevi, Prince, 67  
 SHAO, Chuanyong, 62  
 Sochard, Sabine, 43  
 Soum-Glaude, Audrey, 47  
 Stutz, Benoit, 67  
  
 Tessonneaud, Michaël, 30  
 Thebault, Martin, 17, 41, 57  
 Thil, Stéphane, 12  
 Thomas, Laurent, 47  
 Tittlein, Pierre, 69  
 TOIFANE, Hachmi, 69  
 TOUSSAINT, Evelyne, 67  
 TRAN LE, Anh Dung, 69  
 Tuomiranta, Arttu, 14  
  
 Vaillon, Rodolphe, 50, 70  
 Villefranque, Najda, 16  
 Vossier, Alexis, 26, 50  
  
 Woloszyn, Monika, 56  
 Wurtz, Frédéric, 72  
  
 ZALEWSKI, Laurent, 69, 74