

Table des matières

Culture de microalgues en photobioréacteur couplé avec des panneaux photovoltaïques semi-transparents : effet sur la productivité en biomasse, Thibault Combroux [et al.]	4
Etude d'un système hybride photoprocédé / photovoltaïque à haute efficacité pour la production de carburants solaires., Jeremi Dauchet [et al.]	6
IDEA4Sun project: Intelligent Design & Experimental Application of Spectral Splitting and Selective Surfaces for PV-CST compact hybridization, Nicolás Passarelli [et al.]	7
Modélisation et optimisation de revêtement sélectif à séparation spectrale pour l'hybridation PV-CST : bilan et perspective, Antoine Grosjean [et al.]	9
Vers une métallurgie solaire décarbonée : réduction d'oxyde de fer par l'hydrogène, l'ammoniac et l'urée sous flux lumineux concentré, Marion Luu [et al.]	11
Caractérisation énergétique d'un cuiseur solaire pour un restaurant, Bastien Sanglard [et al.]	13
SOLOWTECH: an innovative low-tech, fixed-focus solar concentrator for high temperature craft purposes, Jean Chery [et al.]	14
Analyse du transfert radiatif dans un récepteur solaire à lit fluidisé gaz-solide., Julien Djeumegni [et al.]	15
Développement d'une méthode de fluxmétrie optique pour la caractérisation de systèmes solaires à concentration, Anita Haeussler [et al.]	17
Informations sur la troisième rénovation de la tour solaire Thémis : des héliostats flexibles et fiables, Emmanuel Guillot [et al.]	19
Vous et EU-SOLARIS, le réseau européen d'infrastructures de recherche dédié au solaire à concentration, Emmanuel Guillot [et al.]	21

Towards High-Temperature Solar Thermophotovoltaics with Integrated Thermal Storage, Baptiste Chatila-Brunotte [et al.]	23
Plateforme photovoltaïque de démonstration et d’enseignement à visée scientifique pour la solarisation des toitures industrielles, Antoine Grosjean [et al.]	25
Rooftop Photovoltaic system detection in heterogeneous urban and rural areas: application to French territories, Mohamed Ennhiri [et al.]	27
Confort thermique intérieur et extérieur : le cas des toiles d’ombrage comme stratégie d’adaptation estivale., Valentin Lahaye [et al.]	29
Multi-objective optimization of photovoltaic integration on building envelope using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization: A case study of residential buildings in France, Farzaneh Changizi [et al.]	30
HIGH-PAD: SELF-SNOW REMOVAL HIGH-ALTITUDE PV SOLAR POWER PLANTS, Ishan Gajurel	31
COMPARATIVE DESIGN OF SOLAR-INTEGRATED HEATING SYSTEMS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS: A CASE STUDY IN CHAMBÉRY, FRANCE, Hadi Rachidi	32
Modeling the Climatic Aging of Floating Photovoltaic Systems: Hygrothermal and Wave-Induced Mechanical Stress Analysis Across Three Climate Zones, Jad Ait Ouabd [et al.]	33
ClimatSunPV: Etude de composants PV intégrés au bâti aux fonctionnalités photoniques, capacité d’auto-rafraichissement et contribuant à l’atténuation des effets d’îlot de chaleur urbain., Zeinab Aldroubi [et al.]	35
L’intermittence n’est déjà plus un problème, Thomas Fasquelle	37
2D Thermal Model of a Thermochemical Storage Reactor, Abdul-Gafar Adegoke Yunus [et al.]	38
L’optimisation dynamique pour la gestion du stockage dans une centrale solaire thermique, Alix Untrau [et al.]	39
Prise en compte des effets d’entrée et de convection naturelle dans la modélisation 1D des systèmes de stockage thermocline de type dual média, Armand Korsaga [et al.]	40
MICRO PUMPED STORAGE HYDROPOWER An Installation Coupled with Solar Energy, Agustin Brianese [et al.]	41

Prévisions probabilistes de la ressource solaire : intérêt des approches hybrides et résultats d'un exercice de benchmark, Philippe Lauret [et al.]	42
Hybridation des systèmes de conversion de l'énergie solaire : enjeux, leviers et limites., Alexis Vossier	44
Liste des auteurs	44

Culture de microalgues en photobioréacteur couplé avec des panneaux photovoltaïques semi-transparents : effet sur la productivité en biomasse

Thibault Combroux * ¹, David Burrueco-Subirà ², Pierre Albrand ¹, Jeremy Pruvost ¹, Helene Marec ¹, Michele Manca ², Mariana Titica[†] ¹

¹ Bioprocédés Appliqués aux Microalgues (GEPEA-BAM) – Laboratoire de génie des procédés - environnement - agroalimentaire, laboratoire de génie des procédés – 37 Bd de l’Université, 44600 Saint-Nazaire, France

² Leitat Technological Center (LEITAT) – Carrer de la Innovació, 2, 08225 Terrassa, Barcelona, Espagne, Espagne

Les microalgues sont des microorganismes photosynthétiques transformant ainsi le carbone inorganique, et autres nutriments, en différentes biomolécules d’intérêts en présence de lumière et ce avec une productivité surfacique bien supérieure aux plantes terrestres. Parmi les composés synthétisés par ces microorganismes, les lipides ont le potentiel d’être convertis en biocarburants afin de participer à la transition énergétique du transport maritime et aérien, secteurs pour lesquels l’électrification s’avère complexe. Dans ce contexte, le projet Horizon Europe COCPIT (<https://www.cocpit-horizon.eu/>) vise la production à grande échelle en conditions solaires ainsi que le raffinage de cette biomasse en, notamment, carburant d’aviation durable (*sustainable aviation fuels* – SAF).

Pour ce faire, la culture de microalgues en photobioréacteur (PBR) intensifié à fin film ruisselant de type AlgoFilm est considérée. Précédemment, il a été montré que la régulation thermique d’un tel système en conditions solaires implique une consommation énergétique élevée. Une solution explorée est l’utilisation de panneaux photovoltaïques semi-transparents (STPV) couplés au PBR (Louveau, 2023). L’objectif de ce couplage est de maximiser la productivité en biomasse tout en minimisant la quantité d’énergie apportée pour maintenir la culture viable. Les STPV doivent ainsi absorber un maximum des infrarouges (NIR & IR) pour limiter la montée en température de la culture et permettre de produire de l’électricité pour alimenter les systèmes annexes du PBR, tout en transmettant la lumière visible nécessaire à la photosynthèse (Photosynthetic Active Radiation, PAR).

Ce travail présente une étude préliminaire visant à quantifier l’impact de ce couplage sur la productivité en biomasse en condition de laboratoire. Des cultures en chémostat de *Parachlorella kessleri* ont été réalisées pour une densité de flux de photon et taux dilution donnés, et ce, sur six PBR miniaturisés de type airlift en parallèle (EOSS2, Busnel et al. 2021). Trois échantillons de panneau photovoltaïque organique (OPV) semi-transparent sur support en verre avec des couches actives sont considérés : P3HT:PC71BM, PTB7-Th:IEICO-4F et PBDB-TF-T1:ITIC-4F. Deux des panneaux les plus prometteurs ont également été étudiés avec l’ajout d’un film de contrôle solaire permettant une absorption plus importante dans l’infrarouge et une atténuation de la température. Les STPV, ayant des transmittivités allant de 20,9% à 38,4% dans le PAR,

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: mariana.titica@univ-nantes.fr

ont été placés devant cinq des six PBR, le dernier servant de contrôle. Des chutes de productivité surfacique de biomasse comprises entre 16% et 37% par rapport au cas de référence sont notées. Les pertes de productivité observées sont inférieures à ce que notre expérience pratique de mise en culture laissait attendre, compte tenu des transmittivités des panneaux étudiés. Ceci nous conduit à approfondir l'étude à une échelle plus réaliste. Les travaux en cours visent à investiguer, en conditions solaires, l'impact du couplage sur la thermique, la production d'électricité, ainsi que les productivités en biomasse et en lipides.

Mots-Clés: Photovoltaïque Semi, Transparent, Photobioréacteur, Microalgues, SAF

Etude d'un système hybride photoprocédé / photovoltaïque à haute efficacité pour la production de carburants solaires.

Jeremi Dauchet ^{*† 1}, Jean-François Cornet ¹, Olivier Farges ², Fabrice Gros ¹, Rodolphe Vaillon ³, Thomas Vourc'h ¹

¹ Institut Pascal (IP) – Centre National de la Recherche Scientifique, Université Clermont Auvergne, Institut national polytechnique Clermont Auvergne – Campus Universitaire des Cézeaux, 4 avenue Blaise Pascal, TSA 60026 / CS 60026, 63178 Aubière Cedex, France

² Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – Université de Lorraine - ENSEM - ESSTIN, 2 avenue de la Forêt de Haye, TSA 60604, 54518 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France

³ Équipe Photonique (LAAS-PHOTO) – Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes – France

La photosynthèse artificielle est l'une des pistes crédibles envisagée (avec les cycles thermochimiques) pour produire des carburants solaires chimiques liquides ou gazeux (H₂, CH₄, CH₃OH,...), aisément stockables, en très grande quantité, et ne produisant pas d'émissions nettes de gaz à effet de serre. Parmi les technologies envisagées, on se concentre ici sur les cellules photo-électrochimiques (PEC) car elles ont l'avantage indéniable d'un grand nombre de degrés de liberté dans l'optimisation. Ce procédé permet par exemple de produire de l'hydrogène avec un rendement théorique maximum de 43

Mots-Clés: cellules photoélectrochimiques, hybridation, efficacité énergétique, bilan détaillé, thermique

*Intervenant

†Auteur correspondant: Jeremi.dauchet@sigma-clermont.fr

IDEA4Sun project: Intelligent Design & Experimental Application of Spectral Splitting and Selective Surfaces for PV-CST compact hybridization

Nicolás Passarelli ¹, Antoine Grosjean ^{2,1}, Amine Mahammou ¹, Aissatou Diop ¹, Béatrice Plujat ¹, Sébastien Quoizola ¹, Laurent Thomas ¹, Audrey Soum-Glaude ^{* 1}

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

² EPF Ecole d’Ingénieurs Montpellier – EPF, 21bis boulevard Berthelot, Montpellier, France – 21 Boulevard Berthelot 34000 Montpellier, France

Where PV directly converts solar radiation into electricity, solar thermal generates heat, up to mid- to high temperatures with Concentrated Solar Thermal (CST), when half of the global energy demand is for heat (IEA). Combining both technologies in compact hybrid PV-CST systems allows producing both electricity and heat in areas where the cost of land is high, be it for residential or commercial areas, or small businesses and industries. This calls for a spectral selection, separating wavelengths of interest for PV and reflecting the rest towards a solar thermal absorber, thus taking advantage of the full range of the solar irradiation. The absorber surface is also readapted to this truncated solar spectrum.

Capitalizing on SelHySol project (2022-2025, Occitanie Region & Perpignan Univ.) findings, the new IDEA4Sun project (2025-2027, idea4sun.cnrs.fr), funded by the Horizon Europe Marie Skłodowska-Curie Actions Postdoctoral Fellowships program, will develop multilayer coating solutions to ensure the aimed spectral selectivity. These solutions aim to be sustainable, thus only materials, deposition techniques and precursors with low environmental impact and architectures will be selected. In the same spirit, the project will be mostly centered on numerical simulations and optimizations, and only the most relevant solutions will be synthesized experimentally as validation. Designing efficient solutions with these constraints can however be challenging. The project will provide a reliable design tool, based on the SolPOC in-house open-source code (github.com/SolPOCandCo), in which artificial intelligence is implemented to find the most efficient architectures by solving complex multi-objective and multiple-variable optimization. Surface texturing and heat propagation in the absorber coating will also be studied using free electromagnetic and thermal and multiphysics codes, respectively. The experimental feasibility will be demonstrated by sputtering deposition and chemical and optical characterization of the synthesized coatings.

Complying with HE MSCA PF objectives, the IDEA4Sun project scientific and technical methodology, work program and open science practices will be presented, as well as the involved team. Previous studies at PROMES-CNRS will also be summarized as proofs for the credibility of the IDEA4Sun project. In particular, TiO₂/SiO₂ selective mirror architectures were validated in the SelHySol project; W/WSiCH/TaOxNy solar selective absorber coatings were developed in the

*Intervenant

ANR NANOPLAST project (2019-2024, nanoplast.cnrs.fr).

Mots-Clés: Spectral selectivity, PV, CST hybridization, Optical design, Solar coatings

Modélisation et optimisation de revêtement sélectif à séparation spectrale pour l'hybridation PV-CST : bilan et perspective

Antoine Grosjean * ^{1,2}, Amine Mahammou ³, Claire Jolly ¹, Pauline Bennet ⁴, Béatrice Plujat ³, Sébastien Quoizola ³, Laurent Thomas ³, Audrey Soum-Glaude *

2

¹ EPF (EPF) – EPF, 21bis boulevard Berthelot, Montpellier, France – 21 bd Berthelot, 34000 Montpellier, France

² Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

³ Université de Perpignan Via Domitia (UPVD) – Laboratoire PROMES-CNRS – 52 avenue Paul Alduy - 66860 Perpignan Cedex 9, France

⁴ Institut des Matériaux, de Microélectronique et des Nanosciences de Provence (IM2NP) – Aix Marseille Université, Université de Toulon, Centre National de la Recherche Scientifique – Faculté des Sciences Avenue Escadrille Normandie Niemen Case 14213397 Marseille Cedex 20, France

Une partie de nos besoins en chaleur et en électricité peut être satisfaite grâce aux systèmes solaires thermiques (ST) et photovoltaïques (PV). Les systèmes PV sont aujourd'hui largement adoptés par rapport aux systèmes thermiques en raison de leur accessibilité et de leur fiabilité. Cependant, une part non négligeable de nos besoins en chaleur et particulièrement la chaleur industrielle pourrait être mieux couverte par des systèmes solaires thermiques, notamment grâce la concentration (CST) possédant de plus l'avantage de pouvoir stocker la chaleur à moindre coût. La combinaison des technologies PV et CST dans un seul système permettrait une production simultanée d'électricité et de chaleur à des températures moyennes à élevées pour répondre à des besoins traditionnellement couverts par des combustibles fossiles. Pour réaliser cette hybridation, plusieurs approches sont possibles ; placer un absorbeur thermique derrière le module PV limitant ainsi la température atteignable pour les collecteurs utilisant des cellules en silicium, ou séparer la production de chaleur et d'électricité grâce à la séparation spectrale. Dans cette dernière certaines plages de longueurs d'onde du spectre solaire sont dirigées soit vers le système PV, soit vers le système CST, optimisant ainsi la conversion énergétique dans un système hybride PV-CST, comme exploré par les projets SelHySol (2022-2025, Occitanie Region & Perpignan Univ.) et IDEA4Sun (2025-2027, idea4sun.cnrs.fr).

Pour cela, un revêtement sélectif à séparation spectrale est absolument nécessaire pour assurer la bonne conversion de l'énergie solaire dans le système PV-CST. Ce revêtement doit suivre l'une des deux stratégies suivantes: i) transmettre une plage spectrale spécifique vers le système PV tout en réfléchissant les autres longueurs d'onde vers le système CST, ou ii) transmettre une plage spectrale spécifique vers le système CST tout en réfléchissant le reste vers le système PV.

Pour étudier les revêtements sélectifs à séparation spectrale, nous avons créé notre propre outil

*Intervenant

de modélisation et d'optimisation de traitement de surface pour l'énergie solaire déployé gratuitement via un dépôt GitHub. Cet outil a été utilisé conjointement avec la plateforme Nevergrad pour identifier les méthodes d'optimisation les plus prometteuses en réalisant des études de benchmark pour concevoir des revêtements minces et performants. Ce processus nous a permis de réaliser plusieurs avancées par rapport à la bibliographie. Il a proposé des solutions adaptées aux deux stratégies de découpage spectral, en utilisant des matériaux peu coûteux, peu polluants et couramment employés dans les dépôts de couches minces, comme le SiO et le TiO, compatibles avec la fabrication d'échantillons au laboratoire PROMES.

Nous présenterons une synthèse des méthodes de modélisation et d'optimisation à mettre en place pour obtenir des revêtements à découpage spectral performant, tout en détaillant les principaux indicateurs de performance optique obtenus, l'effet de l'angle d'incidence, l'impact de différents matériaux ou encore la faisabilité d'adapter le revêtement à différentes cellules PV. Sur la base des résultats expérimentaux de SelHySol, et pour soutenir la recherche future, nous fournirons une perspective de nos développements futurs pour la conception de systèmes hybrides compacts PV-CST.

Mots-Clés: Spectral selectivity, PV, CST hybridization, Optical design, Solar coating

Vers une métallurgie solaire décarbonée : réduction d'oxyde de fer par l'hydrogène, l'ammoniac et l'urée sous flux lumineux concentré

Marion Luu * ¹, Marie-Hélène Pietraru ¹, Bastien Sanglard ¹, Julian Carrey
¹, Sébastien Lachaize^{† 1}

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

La sidérurgie est un secteur qui contribue actuellement à environ 7% des émissions mondiales de CO₂. 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 un procédé bas-carbone de production de fer fonctionnant avec des réducteurs décarbonés et/ou biosourcés – dihydrogène, ammoniac et urée. L'urée, qui peut être biosourcée si on l'extrait de l'urine des mammifères, permet, lors de sa décomposition, la production de deux équivalents d'ammoniac. Quant à la source de chaleur nécessaire à la réduction, nous nous sommes intéressés au solaire à concentration qui permet d'éviter les émissions lors de l'utilisation.

Nos expériences ont été réalisées sur des boulettes d'oxyde de fer industrielles ou sur des disques coupés dans ces boulettes placés dans un simulateur solaire. Nous commencerons par rappeler nos précédents résultats sur l'utilisation de dihydrogène et d'ammoniac comme agents réducteurs (1,2) : nous avons pu comparer différents protocoles comme le retournement progressif des boulettes ou l'utilisation de disques. Dans ce dernier cas, nous avons pu obtenir près de 96% de rendement en 2 min pour l'hydrogène et plus de 95% en 6 min pour l'ammoniac. Nous avons ainsi observé des temps de réduction plus longs pour l'ammoniac, qui pourraient être dus à une diffusion plus lente liée à la taille de la molécule d'ammoniac.

La présentation se concentrera principalement sur les résultats obtenus récemment avec l'urée comme réducteur. Deux voies ont été explorées pour libérer l'ammoniac contenu dans l'urée : la pyrolyse d'urée sèche et l'hydrolyse d'urée en solution catalysée par l'uréase. La première voie a consisté à exposer des disques d'oxyde de fer et de l'urée – placée en dessous des disques – au flux lumineux. Cela nous a permis de décomposer thermiquement l'urée et d'obtenir des quantités d'ammoniac suffisantes pour réduire les disques à plus de 90% en moins de 20 min. Cependant, certains produits de la décomposition thermique de l'urée sont trop stables dans nos conditions expérimentales et la deuxième voie a été nécessaire pour récupérer les deux équivalents d'ammoniac disponibles dans l'urée. L'hydrolyse de l'urée en solution, catalysée par l'uréase extraite de graines de soja, nous a permis d'obtenir une solution d'ammoniac avec des rendements proches de 100% : la totalité de l'urée a ainsi été décomposée et les deux équivalents d'ammoniac ont été produits. Cet ammoniac en solution a ensuite été concentré et la pression de vapeur saturante de la solution a été exploitée pour obtenir des atmosphères d'ammoniac

*Intervenant

†Auteur correspondant: lachaize@insa-toulouse.fr

suffisamment pures. Cela nous a finalement permis d'aboutir à des taux de réduction supérieurs à 90% en seulement 6 min d'exposition au flux.

(1) Sanglard *et al.*, Solar Energy, 2024

(2) Luu *et al.*, Solar Energy, 2025

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

Caractérisation énergétique d'un cuiseur solaire pour un restaurant

Bastien Sanglard ^{*† 1}, Thomas Fasquelle ¹, Séverine Barbosa ¹, Benjamin Kadoch ¹

¹ Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (IUSTI) – Aix Marseille Université, Centre National de la Recherche Scientifique – Laboratoire IUSTI Technopôle de Château-Gombert 5 rue Enrico Fermi 13453 Marseille cedex 13 FRANCE, France

Le travail présenté ici a pour objectif de caractériser énergétiquement une cuisine solaire adaptée à un restaurant et qui repose sur un système comprenant un collecteur Scheffler, un réflecteur secondaire et une plaque de cuisson. Le collecteur Scheffler est utilisé en raison de son point focal fixe et déporté qui permet de placer la plaque de cuisson à l'intérieur du restaurant alors que le collecteur est à l'extérieur. Le réflecteur secondaire, quant à lui, est utilisé pour permettre au flux solaire concentré d'atteindre la plaque de cuisson, qui doit être horizontale. C'est donc le système complet, composé d'un concentrateur Scheffler, d'un réflecteur secondaire et d'une plaque de cuisson qui a été étudié. Pour cette étude, l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) dispose d'un banc de test composé d'un Scheffler de 8 m² et d'un réflecteur secondaire rectangulaire plat ainsi que d'une plaque en acier galvanisé trouée permettant au flux solaire concentré d'atteindre le fond de la casserole directement. La caractérisation repose sur la méthode des tests standards décrite par la norme ASAE S580.1 corrigée utilisée dans de nombreuses publications. Cette méthode permet d'accéder à la puissance standard et au rendement énergétique de l'installation en se basant sur la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique stockée dans de l'eau contenue dans une casserole couverte et dont la montée en température jusqu'à ébullition est enregistrée par thermocouple(s). Les tests standards permettent le calcul des indicateurs de performances énergétiques tel que la puissance et le rendement classique et standardisé par une irradiance directe incidente pour permettre la comparaison avec d'autre système situé ailleurs. Les résultats de la caractérisation dans différentes configurations (fond peint ou non, isolation ou non) seront présentés ici. Par exemple, la puissance standard du système lorsque la casserole n'est pas peinte et lorsque la différence 50 °C entre la température de l'eau et celle ambiante, est de 789 W et augment de plus de 60% lorsque l'on peint la casserole puisqu'elle atteint 1296 W. Ces valeurs correspondent respectivement à des rendements globaux (réflecteur primaire, secondaire et casserole) standardisés de 16,3 % et 27,9 %. De plus, des perspectives seront aussi présentées, telles que la comparaison de notre système avec un similaire à Malaga en Espagne ou l'introduction d'une plaque en fonte permettant de se rapprocher d'une installation réelle.

Mots-Clés: Test standard, Cuiseur Solaire, Énergétique, Scheffler

*Intervenant

†Auteur correspondant: bastien.sanglard@univ-amu.fr

SOLOWTECH: an innovative low-tech, fixed-focus solar concentrator for high temperature craft purposes

Jean Chery * ¹, Alain Ferriere ², Lilian Geolle ¹, Anita Haeussler ², Idriss
Boungou ²

¹ Géosciences Montpellier – Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Université des Antilles, Université de Montpellier – Place Eugène Bataillon - 34095 Montpellier cedex 5, France

² Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

A new and innovative solar concentrating system is presented, aiming at delivering concentrated solar beam to a fixed receiver dedicated to craft activities at temperature ranging above 650°C, like for example pottery, art glassware or metal forging. The design of the device features a 2.26 m² truncated parabolic mirror rotating around its focal point. A prototype named Solowtech was constructed according to low-tech guidelines, such as the utilization of common materials, user-friendly components and accessible techniques for the assembly. The optical performances of the device were assessed by implementing a reflective imaging method. The analysis of the distribution of concentration factor and of the beam power delivered on a vertical plane in the focal area shows attractive figures which are likely to be suited to the targeted applications. The peak concentration factor reaches 2300 and the beam power 1820 W. Additional work is needed to demonstrate the capability of Solowtech to actually achieve a temperature of 1100°C in a cavity-receiver.

Mots-Clés: Low, tech, Solar concentrating system, Solar craftware

*Intervenant

Analyse du transfert radiatif dans un récepteur solaire à lit fluidisé gaz-solide.

Julien Djeumegni *¹, Cyril Caliot *

^{2,3}, Samuel Mer *

¹, Adrien Toutant *

1

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

² Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour - UPPA (FRANCE) – 1 Allée du Parc Montaury, 64600 Anglet, France

³ Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications [Pau] (LMAP) – Université de Pau et des Pays de l'Adour, Centre National de la Recherche Scientifique – Bâtiment IPRA - Université de Pau et des Pays de l'Adour Avenue de l'Université - BP 1155 64013 PAU CEDEX, France

Les lits fluidisés gaz-solide possèdent d'excellentes propriétés thermiques, telles que leur capacité d'échange et leur inertie thermique. Ces atouts en font un excellent candidat comme fluide de transfert thermique et de stockage pour certains procédés industriels haute température, répondant aux enjeux de la transition énergétique. Les centrales solaires à concentration s'inscrivent dans ceux-ci. Le développement des centrales à tour de troisième génération vise à augmenter la température de sortie du récepteur au-delà de 700°C. Les fluides de transfert actuels ne sont pas adaptés à ces niveaux de température. Dans ce contexte, le laboratoire PROMES développe depuis une vingtaine d'années les récepteurs solaires à lit fluidisé en circulation ascendante. Dans ce système, un mélange gaz-particules circule au sein de tubes verticaux exposés au rayonnement solaire concentré.

La compréhension et la maîtrise de l'effet du rayonnement thermique sur les échanges pariétaux ainsi que sur le bilan énergétique échangé durant l'ascension des particules restent actuellement des verrous scientifiques pour le développement de cette technologie. L'objectif principal de ce travail vise à quantifier l'échange radiatif, entre les particules et les particules et la paroi, à l'aide d'une étude du problème radiatif couplé avec les paramètres hydrodynamiques de l'écoulement gaz-solide. Cette étude n'a, à notre connaissance, jamais été réalisée dans le cadre de simulations fines d'écoulement fluide-particules solides – donnant accès à la position en temps réel des particules en fonction de la vitesse de fluidisation. Elle constitue une ouverture majeure vers un couplage multiphysique rigoureux. Afin d'évaluer les différents échanges radiatifs, on suppose que le milieu gazeux est transparent et que les particules sphériques se comportent comme des corps noirs. La température des parois et des particules est dans un premier temps imposée. La méthode de Monte Carlo est utilisée pour calculer le flux radiatif net échangé par chaque particule avec les parois. L'outil de calcul Stardis de MESOSTAR est utilisé, dans une version modifiée, afin de calculer les facteurs de forme entre chaque particule et les parois. Des

*Intervenant

simulations numériques pour un écoulement gaz-solide au sein d'une cavité avec des parois non réfléchissantes ont déjà été obtenues avec succès.

Remerciements: this work was funded by the french "Investments for the future" ("Investments for the future") program managed by the National Agency for the Research (ANR) under contract ANR-10-LABX-22-01 (Labex SOLSTICE)

Mots-Clés: transfert radiatif, centrale solaire à concentration, lit fluidisé, gaz, solide.

Développement d'une méthode de fluxmétrie optique pour la caractérisation de systèmes solaires à concentration

Anita Haeussler * ¹, Emmanuel Guillot *

2

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

La distribution du flux solaire est un paramètre fondamental dans les systèmes à concentration solaire (CSP), car elle conditionne non seulement la performance du système, mais également sa sécurité d'exploitation. Par ailleurs, l'évaluation de l'efficacité du système nécessite une mesure fiable de la puissance incidente. Dans ce contexte, les mesures expérimentales de flux solaire, aussi appelées fluxmétrie, sont essentielles tant pour la recherche que pour l'exploitation industrielle des installations CSP.

Cependant, en raison des conditions extrêmes de température (jusqu'à 4000 °C), de densité de flux (jusqu'à 20 000 kW/m²) et de puissance thermique (jusqu'à 1000 MWth), la mesure expérimentale du flux solaire demeure une tâche complexe. À l'heure actuelle, il n'existe aucune norme universelle encadrant ces mesures, ce qui accentue les difficultés de comparaison et de standardisation entre laboratoires et installations.

L'état de l'art distingue deux grandes familles de méthodes de mesure du flux solaire : les méthodes directes et les méthodes indirectes. Les méthodes directes s'appuient sur un réseau de capteurs de flux thermique répartis sur une cible fixe ou mobile, permettant par interpolation spatiale de reconstituer une carte du flux. Les méthodes indirectes, quant à elles, utilisent une caméra pour enregistrer la luminance d'une cible blanche, quasi-lambertienne. Ces images sont ensuite calibrées radiométriquement à l'aide de capteurs de flux pour produire des cartographies de densité de flux. En raison de leur rapidité, de leur haute résolution spatiale et de leur mise en œuvre relativement simple, les méthodes indirectes sont les plus couramment employées.

La méthodologie présentée dans cette étude a été mise en œuvre sur les installations solaires de petite et moyenne puissance (MSSF) du laboratoire PROMES-CNRS à Font-Romeu. Ces installations permettent d'atteindre des flux de l'ordre de 15 000 kW/m² pour des puissances allant de 1 kW à 6 kW. Le protocole expérimental comprend plusieurs étapes : acquisition d'images, calibrations spatiale et radiométrique, ainsi que la normalisation selon l'irradiation solaire directe (DNI). Une caméra est placée dans l'axe optique de la parabole, tandis qu'une cible lambertienne est positionnée en foyer. La calibration radiométrique est assurée par un banc à calorimètre, tandis que la calibration spatiale est assurée à l'aide d'une référence de taille connue, permettant d'obtenir l'échelle de l'image.

*Intervenant

Les résultats obtenus ont permis de quantifier les différentes sources d'incertitude affectant la mesure et de proposer des stratégies de réduction de ces incertitudes. Cette approche a été appliquée à différentes configurations expérimentales afin d'enrichir les connaissances sur la distribution du flux solaire et d'améliorer la fiabilité des mesures. Ce travail contribue ainsi à l'optimisation des techniques de caractérisation des systèmes solaires à concentration.

Mots-Clés: Fluxmétrie, Concentration solaire, Distribution du flux

Informations sur la troisième rénovation de la tour solaire Thémis : des héliostats flexibles et fiables

Emmanuel Guillot *¹, Régis Rodriguez¹, Antoine Perez¹, William Baltus², Michaël Tessonnaud², Olivier Bertelot², Marc Cordomi², Olivier Teyssot²

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

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

Le laboratoire PROMES-CNRS exploite la tour solaire Thémis pour tester et valider des processus innovants de capture de l'énergie solaire, tels que la production d'électricité, de chaleur industrielle, et de carburants solaires. La tour peut délivrer des températures allant jusqu'à 1000°C pour des applications industrielles, et jusqu'à 1500°C pour les tests de matériaux, notamment pour les récepteurs solaires. La tour dispose de deux points focaux : l'un jusqu'à 500kWth et 1,5m de taille, l'autre jusqu'à 4500kWth et jusqu'à 4x4m. Pour maintenir des performances optimales, nous avons mis à jour le système de contrôle du champ d'héliostats et réhabilité leurs mécanismes. Cette communication présente ces améliorations après une revue des systèmes précédents.

L'histoire de Thémis et ses spécifications évolutives seront brièvement décrites, en mettant en lumière les trois systèmes de contrôle des héliostats : la topologie de puissance et de communication, les principales caractéristiques de contrôle et de commande, ainsi que leurs possibilités.

1. Les origines : première tour solaire à sel fondu pour produire de l'électricité

La centrale Thémis est la première grande tour solaire avec un circuit de sel fondu pour produire de l'électricité, démarrée en 1982 sous la direction d'EDF avec le soutien de nombreuses entreprises et partenaires académiques français. La centrale a été utilisée pendant quelques années avant d'être arrêtée, l'électricité nucléaire étant privilégiée.

2. Interlude : une tour solaire pour la recherche en astrophysique

Le démantèlement de Thémis a été mis en suspens en 1987 lorsqu'un consortium de recherche a commencé à utiliser le site et ses miroirs pour des projets d'astrophysique. Plusieurs projets ont été menés jusqu'au début des années 2000, dont la détection de rayons gamma. Un nouveau système de contrôle a été développé par CNRS-IN2P3 pour ces applications : première réjuvenation des héliostats.

3. Retour aux origines : Thémis comme infrastructure de recherche

Au début des années 2000, alors que le démantèlement du site était une fois de plus discuté, un consortium a été formé pour convertir l'ensemble du site afin d'accueillir des projets de

*Intervenant

développement des énergies renouvelables. PROMES-CNRS a été autorisé à reprendre la tour solaire et la moitié du champ d'héliostats pour mener des recherches sur l'énergie solaire concentrée à une échelle plus grande que celle du four solaire de 1000 kW d'Odeillo. La deuxième réjuvenation des héliostats a été réalisée : mise à niveau et extension du système radio IN2P3 aux héliostats, développement de systèmes d'évaluation de flux, évaluation optique et réglage des héliostats, entretien mécanique, réhabilitation de la tour...

4. Troisième réjuvenation : retour aux communications filaires

Cette communication détaillera la troisième réjuvenation du champ d'héliostats de Thémis : nouveau réseau de communication (Ethernet filaire, hybride optique et cuivre), nouvelle distribution de l'alimentation électrique, réhabilitation mécanique, évaluation de l'état des miroirs par drone. Les étapes en cours et à venir seront présentées : conversion du logiciel existant des liaisons radio lentes et peu fiables vers une communication filaire rapide, réhabilitation optique des miroirs, et réglages pour le projet européen actuel Powder2Power.

Mots-Clés: tour solaire, héliostats, CSP, CST, contrôle commande, pilotage

Vous et EU-SOLARIS, le réseau européen d'infrastructures de recherche dédié au solaire à concentration

Emmanuel Guillot * ¹, Diego Martínez Plaza ²

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

² EU-SOLARIS ERIC (EU-SOLARIS ERIC) – CIEMAT-PSA Tabernas, Almeria, Espagne

Cette communication vise d'abord à **présenter l'ERIC EU-SOLARIS**, notamment ce qu'elle peut vous apporter pour vos recherches avec ou sur le solaire à concentration. Votre laboratoire ou votre entreprise peut également **devenir membre de EU-SOLARIS** : les avantages seront présentés.

C'est quoi un ERIC ?

Un ERIC est une entité légale paneuropéenne selon un règlement de la Commission Européenne.

Les membres sont des états Européens.

Chaque gouvernement membre coordonne ensuite de multiples structures participant à l'ERIC : organisations de recherche, laboratoires, universités...

C'est quoi EU-SOLARIS ?

EU-SOLARIS est le nom de " *European Solar Research Infrastructure for Concentrated Solar Power* ".

La raison d'être de d'EU-SOLARIS est d'établir une infrastructure de recherche distribuée de premier plan dédiée à l'énergie solaire concentrée (CSP), intégrant des centres de recherche nationaux européens et promouvant leur coopération.

EU-SOLARIS agit comme un hub central, facilitant le partage des ressources, outils et expertise entre les acteurs du secteur.

EU-SOLARIS ambitionne d'être un pilier clé de la transition énergétique européenne, en stimulant l'excellence scientifique et technologique tout en facilitant le transfert de connaissances vers les acteurs industriels. En rassemblant les compétences européennes, il vise à positionner l'Europe comme pionnière mondiale dans la maîtrise des énergies solaires concentrées.

Objectifs stratégiques d'EU-SOLARIS

- Coordonner les infrastructures existantes

*Intervenant

- Créer un point d'accès unique
- Renforcer les collaborations
- Optimiser les infrastructures
- Partager les bonnes pratiques
- Maintenir l'excellence

=> *Si vos travaux concernent le solaire à concentration, les ressources et savoirs d'EU-SOLARIS peuvent vous être utile !*

Rejoindre EU-SOLARIS : avantages juridiques et opérationnels

Devenir membre d'EU-SOLARIS ERIC offre des avantages juridiques uniques, grâce à sa reconnaissance légale dans l'ensemble de l'Union européenne. Les activités de R&D bénéficient par exemple d'exemptions de TVA. De plus, EU-SOLARIS peut établir ses propres règles de passation des marchés, tout en respectant la transparence et le principe concurrentiel.

Rejoindre EU-SOLARIS : collaboration et coordination

EU-SOLARIS permet une coopération stratégique entre acteurs européens. Les membres participent à la définition de protocoles communs pour tester, qualifier les composants et améliorer les équipements, facilitant ainsi l'harmonisation des standards technologiques. Le consortium promeut également le partage d'infrastructures de recherche et la mobilité du personnel via des échanges structurés entre partenaires, accélérant l'intégration européenne du secteur CSP/CST.

Rejoindre EU-SOLARIS : optimisation et influence stratégique

En évitant les redondances technologiques, EU-SOLARIS optimise l'utilisation des infrastructures existantes en favorisant leur spécialisation.

Les membres influencent directement les agendas de recherche européens (SET-Plan, EERA) et collaborent avec des acteurs clés (industries, institutions). Cela renforce la position de leadership européenne dans le développement des énergies solaires concentrées tout en stimulant l'innovation partagée.

=> *et votre laboratoire ?*

Mots-Clés: politique, infrastructure, réseau, service, r&d, Europe

Towards High-Temperature Solar Thermophotovoltaics with Integrated Thermal Storage

Baptiste Chatila-Brunotte ¹, Félix Fricaud ¹, Guilhem Lesobre ¹, Alexis Vossier ^{* 1}, Maxime Giteau^{† 1}

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

Photovoltaic (PV) cells offer affordable and scalable solar electricity, but their intermittency demands external storage. An alternative, known as concentrated solar power (CSP), harvests sunlight as thermal energy, later converted to electricity, enabling thermal storage and on-demand electricity production. Nevertheless, its higher levelized cost of electricity hampers its competitiveness. Enhancing operational temperatures of CSP systems from $\sim 500^{\circ}\text{C}$ to over 1000°C could significantly improve its prospects, but limitations arise from material and engineering constraints on the solar receiver, storage medium, and heat engine.

A promising way to enable high-temperature energy conversion is to replace the steam turbine of CSP systems by thermophotovoltaic (TPV) cells, which use the PV effect to convert the thermal radiation from any hot emitter into electric power (1). Unlike dynamic engines, TPV systems maintain consistent performance regardless of size and offer greater reliability and reduced maintenance, as they lack moving parts or working fluids. TPV has been an increasingly active research field in the past decade, owing to developments in material science and devices, leading to impressive experimental results (2). Particularly, the idea of using concentrated sunlight to heat the emitter has led to the emergence of Solar TPV (STPV), which has been mainly explored for its potential to approach the 85% solar thermodynamic efficiency limit (3). Despite progress since the first experimental efficiency report in 2013 (4), the efficiency record stands at 8.4% (5).

A key missing element in experimental STPV demonstrations is the integration of high-temperature thermal energy storage between the solar absorber and the TPV emitter. Smart choices in the optical and thermal properties of the system could lead to increased performances and improved dispatchability of electricity generation. We investigate two scenarios:

- An opaque storage material, transferring heat by conduction from the solar absorber to the TPV emitter.
- A semi-transparent storage material, enabling direct absorption of the high-energy part of the solar spectrum by the TPV emitter.

We developed simple numerical models to provide general insights. Preliminary results show that

*Intervenant

†Auteur correspondant: maxime.giteau@cnr.fr

- spectral selectivity brought by the semitransparent material is key in minimizing radiative heat losses in the infrared and enables substantial performance enhancement
- high thermal conductivity is essential to enable significant energy production after illumination.

This work aims to identify configurations that maximize system efficiency while ensuring significant post-illumination energy delivery-advancing the path toward practical high-temperature STPV systems.

(1) A. Datas and R. Vaillon, Chapter 11 - Thermophotovoltaic Energy Conversion (2021), pp. 285–308.

(2) M. Giteau et al., J. Photonics Energy 14, 042402 (2024).

(3) N.-P. Harder and P. W. Würfel, Semicond. Sci. Technol. 18, S151 (2003).

(4) A. Datas and C. Algora, Prog. Photovolt. Res. Appl. 21, 1025 (2013).

(5) R. Bhatt, I. Kravchenko, and M. Gupta, Sol. Energy 197, 538 (2020).

Mots-Clés: TPV, solaire, concentration, haute, température, stockage

Plateforme photovoltaïque de démonstration et d’enseignement à visée scientifique pour la solarisation des toitures industrielles

Antoine Grosjean * ^{1,2}, Thomas Houot ², Gaël Alonzo ², Eric Pastor ²

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

² EPF Ecole d’Ingénieurs Montpellier – EPF Ecole d’ingénieurs – 21 Boulevard Berthelot 34000 Montpellier, France

Afin d’accélérer la production d’électricité photovoltaïque en France, la solarisation des toitures industrielles constitue un levier stratégique, soutenu par des cadres réglementaires tels que la loi APER (2023) et de manière plus indirecte la loi ÉLAN (2018). Ces textes imposent ou encouragent l’intégration de dispositifs de production d’énergies renouvelables sur les bâtiments non résidentiels, indépendamment de leur orientation ou de leur inclinaison. Dans ce contexte, il devient crucial d’étudier les performances des systèmes photovoltaïques installés dans des configurations particulières ou non optimales. Les toits industriels présentent des contraintes spécifiques pour les installations photovoltaïques: comme l’installation de modules monofaciaux ou bifaciaux sur bac acier parfois de différentes couleurs, l’utilisation d’équipements de conversion diversifiés avec un usage croissant des micro-onduleurs ou l’installation à de faibles angles d’inclinaison (entre 5 et 15°) ou selon différentes orientations, y compris une exposition nord. Pour répondre à ces défis, la Fondation EPF et POwR Earth Foundation ont signé une chaire de collaboration pour l’installation d’une plateforme sur le site de l’école d’ingénieur de EPF Montpellier.

Inaugurée en décembre 2024 cette plateforme de démonstration répond à des besoins éducatifs et scientifiques via une méthode combinatoire. Elle permet l’évaluation comparative en conditions réelles d’un total de 8 modules photovoltaïques pour une puissance totale de 1,57 kWc intégrant des cellules N-Type ou P-type, des modules monofaciaux ou bifaciaux montés sur bac à acier blanc ou rouge et couplés à des micro-onduleurs commerciaux. Chaque module est instrumenté pour un suivi en temps réel de sa production électrique, de la consommation des micro-onduleurs, ainsi que de paramètres environnementaux clés tels que la température des modules, la circulation d’air, des jauges de déformation, complétés par une station météorologique dédiée, illustrée par la Figure 1. L’ensemble des combinaisons couvertes permet de répondre aux enjeux des installations actuelles tels que rencontrés par l’industrie.

Cette plateforme poursuit un double objectif : scientifique et pédagogique. Elle propose un support d’enseignement interactif (via API et Grafana) pour des niveaux allant de la licence au master, tout en offrant à la communauté scientifique des données précieuses pour valider des choix technologiques. Après plusieurs mois d’exploitation, les premiers résultats permettent de mieux comprendre l’impact des modules bifaciaux sur différents supports en conditions réelles installés sur bac acier, l’influence des couleurs de la toiture ou l’impact d’une orientation nord (azimut 0°) avec un faible angle d’incidence (15°) sur le productible PV. Des données comme la consommation réelle de différents équipements de conversion complètent l’analyse.

*Intervenant

Mots-Clés: photovoltaïque, toits industriels, modules bifaciaux / monofaciaux

Rooftop Photovoltaic system detection in heterogeneous urban and rural areas: application to French territories

Mohamed Ennhiri * ¹, Martin Thebault ², Boris Nerot ¹

¹ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

² LOCIE – Université de Savoie – France

Project Goal & Context:

The core objective of this work is to improve the large-scale identification of rooftop photovoltaic (RPV) systems across France, building upon the previous work by Thebault et al. and their FRPV database. This involves addressing limitations in existing datasets, enhancing the model’s predictive precision, and incorporating previously missing regions like Corsica, DOM-TOM, and Ile de France. Accurate RPV location data is crucial for urban planning, grid management, and socio-economic analysis related to energy transition.

Methodology & Key Findings:

Database Consolidation: The primary approach involves consolidating and unifying the existing French FRPV database with diverse external datasets from international sources (e.g., Germany, Denmark, Netherlands, China) and augmenting it with specific internal French data. The aim is to assess if integrating heterogeneous data improves model performance.

Heterogeneity Analysis: A significant finding is the substantial heterogeneity among potential external datasets regarding image resolution (ranging from ~10 cm to 80 cm), annotation types (classification vs. segmentation), geographic origin, and data formats. Datasets from China, Denmark, or the Netherlands introduce considerable domain shift challenges compared to French data due to differences in architecture, environment, and imaging conditions.

Model Enhancement: The plan includes a comparative analysis of different Convolutional Neural Network (CNN) architectures. The chosen model will then be retrained using the enriched, consolidated dataset and optimized hyperparameters.

From classification to segmentation: Using Grad-CAM as a first step leverages a trained classification model to understand where it focuses for its prediction. Grad-CAM produces a heatmap highlighting these influential regions, essentially providing a rough object localization. This heatmap isn’t a precise segmentation but acts as an initial spatial guide.

*Intervenant

Mots-Clés: Convolutional Neural Network, Photovoltaic, GIS

Confort thermique intérieur et extérieur : le cas des toiles d'ombrage comme stratégie d'adaptation estivale.

Valentin Lahaye * ¹, Elena Garcia-Nevado ², Marion Bonhomme ¹, Claire Oms ³, Stéphane Ginestet ³

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

² Universitat Politècnica de Catalunya = Université polytechnique de Catalogne [Barcelona] (UPC) – C./Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona, Espagne

³ Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions (LMDC) – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse – INSA-UPS 135 Avenue de Ranguieu - 31077 TOULOUSE CEDEX, France

Le risque de surchauffe dans les villes européennes constitue une préoccupation croissante dans le contexte du dérèglement climatique, caractérisé par des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses (Smid, 2019). Pour y faire face, certaines villes mettent en œuvre des stratégies d'adaptation visant à améliorer le confort thermique dans l'espace public. Parmi elles, l'installation de toiles d'ombrage dans les rues a pour objectif principal de limiter la surchauffe extérieure, mais ces dispositifs peuvent également influencer les conditions thermiques à l'intérieur des bâtiments adjacents. Cette interaction souligne l'importance de considérer les effets croisés entre l'espace public et les espaces bâtis dans l'évaluation des solutions d'adaptation.

Dans cette étude, nous proposons une approche numérique globale pour évaluer le confort thermique estival à la fois dans les logements et dans la rue à l'aide de l'indicateur PET (Température Physiologique Equivalente). Notre méthodologie repose sur un couplage entre une méthode de radiosité pour le calcul des échanges radiatifs en milieu urbain (Bugeat, 2020) et un solveur par éléments finis (Cast3M) permettant la résolution transitoire du problème thermique complet incluant la conduction, la convection, et le rayonnement (Duport, 2021), avec prise en compte des réflexions et transmission multiples, diffuses et spéculaires.

L'analyse se concentre sur l'effet de toiles d'ombrage textiles, une stratégie traditionnelle en climat méditerranéen pour améliorer le confort extérieur (Garcia-Nevado, 2021). Les simulations montrent que ces dispositifs permettent de réduire efficacement la température physiologique équivalente, tant à l'extérieure qu'à l'intérieure, pendant la journée. Néanmoins, leur présence peut aussi limiter le refroidissement nocturne par rayonnement, induisant une surchauffe intérieure résiduelle si aucune stratégie de gestion n'est appliquée (retrait pendant la nuit).

La méthodologie propose ainsi un cadre d'évaluation qui permet d'identifier les stratégies d'aménagement conciliant l'amélioration du confort thermique intérieur et extérieur au sein d'une géométrie dynamique. Elle constitue un outil d'aide à la décision multi-échelle, destiné à orienter architectes et urbanistes vers des solutions d'aménagement cohérentes et complémentaires.

Mots-Clés: rayonnement, toiles d'ombrage, résilience, physique urbaine

*Intervenant

Multi-objective optimization of photovoltaic integration on building envelope using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization: A case study of residential buildings in France

Farzaneh Changizi ^{*† 1}, Martin Thebault ^{*}

¹, Christophe Menezo ^{*}

1

¹ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

As energy prices rise, solar photovoltaic (PV) systems offer a promising solution for residential energy needs. However, mismatches between production and consumption require careful system integration. This study investigates the optimal placement of PV panels on a one-story residential house (100 m² footprint and 30° gable roof), using detailed load profiles from the EtudeELEC dataset, which aggregates electricity consumption data across various heating systems in French households. Several performance indicators-Load Matching (LM), Net Present Value (NPV), Payback Period (PP), Levelized Cost of Energy (LCOE), and Annual Carbon Emissions (ACE)-are optimized using both mono-objective and multi-objective approaches. Results indicate that façades, particularly south- and north-facing ones, significantly enhance LM, while (south-facing) roof provides superior economic returns. The study also analyzes the influence of different load types based on heating systems (electric, gas, heat pump), showing that optimal PV configurations vary accordingly. Two evolutionary algorithms-Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO)-are used and compared, each showing strengths depending on the objective. GA-based multi-objective optimization of LM, PP, and ACE indicators reveals trade-offs, with an optimal configuration of six south-facing roof panels achieving 59% self-consumption and 21% self-sufficiency. Overall, the findings highlight the importance of matching PV deployment strategies to specific building and consumption profiles, and support the use of multi-objective optimization for more comprehensive and contextual PV integration at the building scale.

Mots-Clés: photovoltaic integration, multi objective optimization, residential energy consumption, load matching, economic factor, carbon emission

*Intervenant

†Auteur correspondant: farzaneh.changizi@univ-smb.fr

HIGH-PAD: SELF-SNOW REMOVAL HIGH-ALTITUDE PV SOLAR POWER PLANTS

Ishan Gajurel * ¹

¹ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

The proliferation of Electric Vehicles (EVs) in the automobile industry has made the construction of solar parking at recreational or public establishments such as resorts almost mandatory. The solar parking, which consists of PV panels to generate electricity that is primarily used in charging stations for EVs or for lighting purposes, has a key role in world's transition towards the green energy and sustainable future. However, the onset of snowfall might significantly impede the production of electricity from the PV panels installed on the car parks. Especially in the high altitude regions with huge amount of snowfall, the impact on the production of electricity from the PV panels becomes quite high. Literature offers various approaches for self-removal of snow. Methods ranging from self-heating and electrical heating systems, tilt-angle optimization to mechanical system, hydrophobic coating, chemical methods, nanomaterial coating, and hot fluid circulation for removal of snow are well discussed in the literature. But, not all of these methods are suitable for car parks already existing because some of them such as hydrophobic coating need to be implemented during the production of PV itself while others such as mechanical system tend to be very expensive and sophisticated. This article discusses some of these methods but mainly electrical heating with resistive wires, self-heating and tilt-angle optimization because of their feasibility and scalability in installation on high altitude PV plants and already established car parks. A design is then proposed that attempts to utilize these three methods to create a self-snow removing system.

Mots-Clés: Snow Covered PV, Snow Removal Methods, Self, snow removal, Electrical Heating, Self, Heating

*Intervenant

COMPARATIVE DESIGN OF SOLAR-INTEGRATED HEATING SYSTEMS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS: A CASE STUDY IN CHAMBÉRY, FRANCE

Hadi Rachidi * ¹

¹ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

The transition toward energy-efficient buildings and low-carbon is accelerating across Europe, driven by decarbonization goals, changes in energy policy, and solar technology developments. In regions such as Auvergne-Rhône-Alpes and cities like Chambéry, which have significant winter heating demand, integrating renewable energy sources into residential heating systems is a key challenge. This study presents a comparative design-based analysis of two water-based heating systems, underfloor heating and radiators systems, combined with two types of solar energy sources: solar thermal collectors and solar photovoltaic panels coupled with a heat pump. Secondary sources such as gas or fuel boilers are considered as backup during low solar availability. The aim is to identify which system combination offers the most effective balance between energy performance and practical feasibility for future residential buildings. The heat load is calculated using mechanical engineering principles based on design-outdoor temperature representative of the local climate. The underfloor heating system will be designed using OVplan software from Oventrop, while the PV system will be modeled with Archelios software. A solar thermal design tool will be used to size the thermal collector system. The study compares the required energy input, solar contribution, and efficiency of each configuration.

While not based on long-term climate projections, the research is positioned within the broader context of regional climate evolution, which is expected to gradually influence heating needs. This study serves as a first-phase technical and comparative evaluation, providing design guidance for energy-efficient and solar-integrated residential heating systems in cold-climate regions.

Mots-Clés: Solar thermal, solar PV, heat pump, underfloor heating, radiator, heat load, Chambéry, building energy systems

*Intervenant

Modeling the Climatic Aging of Floating Photovoltaic Systems: Hygrothermal and Wave-Induced Mechanical Stress Analysis Across Three Climate Zones

Jad Ait Ouabd ^{*† 1}, Lucas Arcalis ¹, Martin Thebault ²

¹ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

² LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

As floating photovoltaic (FPV) systems become increasingly popular, their long-term durability under harsh environmental conditions remains a critical concern. This research aims to provide an advanced modeling approach to simulate the climatic aging of FPV modules, focusing on three key degradation mechanisms: hydrolysis, photodegradation, and thermomechanical fatigue. Building on the Kaaya degradation model which we adapted and expanded we assessed the long-term performance of FPV systems over 25 years in three contrasting climate zones: tropical (Grand Étang, Réunion), Mediterranean (Lac du Salagou, France), and desert (Lake Nasser, Egypt).

Our methodology involves daily simulations based on synthetic climate data constructed from Typical Meteorological Year (TMY) datasets, replicated over a 25-year span. Three scenarios were considered: baseline real conditions, a forced-humidity scenario at 100% relative humidity (RH100), and a combined stress case with RH at 100% and daily thermal cycles doubled (RH100CN2), simulating the mechanical stress induced by surface water motion in FPV environments.

Results show that degradation mechanisms are highly climate-dependent. While tropical environments are humid, their low daily temperature variation significantly reduces thermomechanical stress, making them the most favorable in terms of long-term performance. In contrast, Mediterranean and desert climates exhibit faster degradation, driven by stronger UV exposure and pronounced thermal cycling. Notably, our simulations reveal a strong interaction between humidity and temperature in hydrolytic degradation: under forced RH conditions, the desert site initially more resistant in real conditions becomes more damaging than the Mediterranean one. This finding confirms that humidity alone is not sufficient to accelerate hydrolysis; high ambient temperatures amplify chemical activity, making encapsulant materials more vulnerable to degradation.

In the most extreme scenario (RH100CN2), the estimated time to reach a 20% drop in performance ratio (PR = 80%) falls to approximately 4 years in Mediterranean and desert climates, compared to over 13 years in the tropical zone.

This study highlights the necessity of tailoring degradation models to FPV-specific conditions by integrating the combined effects of humidity, UV radiation, temperature, and mechanical

*Intervenant

†Auteur correspondant: aitouabdjad@gmail.com

stress. The implementation of a dynamic thermal cycle detection system further enhances prediction accuracy by accounting for daily variations. These findings can inform future design standards, material choices, and maintenance strategies for FPV installations, especially as they are deployed in increasingly diverse and challenging climate zones.

Mots-Clés: Floating PV systems, Environmental stress modeling, Hydrolysis and photodegradation, Thermomechanical fatigue, Climate, specific aging

ClimatSunPV: Etude de composants PV intégrés au bâti aux fonctionnalités photoniques, capacité d'auto-rafraîchissement et contribuant à l'atténuation des effets d'îlot de chaleur urbain.

Zeinab Aldroubi * ^{1,2}, Y.b. Assoa * ^{† 3}, Mohamed Amara * ^{‡ 4,5}, Christophe
Ménézo * ^{§ 6}

¹ Laboratoire Instrumentation Multi-TEChnique (CEA, LIST) (LIMTEC (CEA, LIST)) – Département
d'instrumentation Numérique (CEA, LIST) – France

² Institut National des Sciences Appliquées (INSA) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA)
- Lyon – France

³ CEA (Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTS, LAM) – CHU Grenoble – F-38000 Grenoble, France

⁴ INL - Ingénierie et conversion de lumière (i-Lum) – Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Ecole Centrale de
Lyon, Univ Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, 69621 Villeurbanne, France – France

⁵ Institut National des Sciences Appliquées (INSA) – Institut National des Sciences Appliquées (INSA)
- Lyon, INSA - Institut National des Sciences Appliquées – France

⁶ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc – Campus
scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

The European energy goals target NZEB or BEPOS and aim to cut greenhouse gas emissions by 55% by 2050 compared to 1990. To achieve this, buildings must use renewable energy sources, as they are major energy consumers. Installing photovoltaic (PV) modules on façades is an effective solution. However, resulting increased PV modules temperature remains a major challenge, as it lowers their efficiency, and could contribute to urban heat island. Our aim is to propose an economical, simple, and innovative solution to cool photovoltaic (PV) modules integrated into buildings in order to improve their electrical output, enhance energy efficiency, and contribute to thermal comfort. For this, a multiscale approach will be defined, combining experimental and numerical studies. The innovative solution will be based on existing cooling methods identified through an ongoing literature review.

In this work, an ongoing thermal and electrical modeling of a basic opaque ventilated PV façade is presented. Modelling hypotheses, an equivalent electrical diagram, and a thermal balance have been proposed. The model is two-dimensional and dynamic, based on a nodal approach, with finite volume discretization along the façade height, assuming uniform solar radiation and accounting for natural ventilation.

The next steps include validating the opaque PV façade model using existing measured data. Additionally, a sensitivity study using the validated numerical model will identify key factors affecting PV façade temperature and electrical output, while thermal and electrical modeling of semi-transparent PV façades will expand the proposed approach.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: ya-brigitte.assoa@cea.fr

[‡]Auteur correspondant: mohamed.amara@insa-lyon.fr

[§]Auteur correspondant: christophe.menezo@insa-lyon.fr

Acknowledgment : This work has been realized in association with INES.2S and is partly funded by the Environmental and Energy Management Agency (ADEME) in France.

Mots-Clés: energie solaire

L'intermittence n'est déjà plus un problème

Thomas Fasquelle * ¹

¹ 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

La transition vers un système électrique fondé sur les énergies renouvelables impose de répondre à des contraintes de variabilité et de suivi de charge. Ce travail présente une revue structurée et critique de la littérature scientifique portant sur le coût actualisé de l'énergie (LCOE), l'analyse de cycle de vie (ACV) et le rôle du stockage (batteries, thermique, power-to-gas) dans des systèmes intégrant solaire et éolien. L'éolien, en raison de sa variabilité temporelle hebdomadaire, permet de limiter les besoins en stockage à court terme, tandis que son association au solaire contribue à réduire les besoins extrêmes liés aux longues périodes sans vent. Ainsi, de nombreux modèles très élaborés montrent déjà qu'un système électrique fonctionnant 100% (ou presque) aux énergies renouvelables est faisable, économiquement viable et peu émetteur de gaz à effet de serre. Il manque encore quelques analyses sur le choix entre curtailment et stockage, des études détaillées d'analyse de cycle de vie de ces systèmes, et des simulations de certaines régions du Monde moins étudiées que d'autres. Ces éléments dessinent une feuille de route claire pour de futures recherches utiles à la conception de systèmes énergétiques durables, réalistes et économiquement viables.

Mots-Clés: Etat de l'art, Gestion de l'intermittence, Simulations

*Intervenant

2D Thermal Model of a Thermochemical Storage Reactor

Abdul-Gafar Adegoke Yunus * ¹, Florine Giraud ¹, Nolwenn Le Pierrès ¹

¹ LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

Thermochemical energy storage (TCES) systems, based on reversible solid-gas reactions like salt hydration and dehydration, provide an efficient mechanism for high-density, long-duration thermal energy storage. This technology is particularly relevant for decarbonizing heat-intensive sectors, such as district heating networks.

To fully understand the transport phenomena within a TCES reactor, effective modelling is essential to predict its performance under different operating condition to guide its design optimization. As a first step of the project, this study develops a 2D dynamic heat conduction model in a homogenous medium, using the finite element method (FEM) to solve the partial differential (PDE) governing the heat transfer. The methodology involves applying Green's theorem to weaken the strong form of the heat equation, then, employing the Galerkin method to transform the weakened PDE into an ordinary differential equation (ODE), and finally, using the Crank-Nicolson scheme for time discretization.

The model is used to analyze the evolution of heat diffusion until the steady-state solution is reached, at which point the simulation time is recorded as the steady-state establishment time. Additionally, this study examines the effect of thermal diffusivity variation on the simulation time within the reactor bed. Thus, this thermal model provides the fundamental basis to develop a more detailed model to describe the operation of TCES reactor.

Mots-Clés: Thermochemical energy storage (TCES), heat transfer modeling, 2D dynamic model, finite element method (FEM)

*Intervenant

L'optimisation dynamique pour la gestion du stockage dans une centrale solaire thermique

Alix Untrau * ¹, Sylvain Serra * ^{† 2}

¹ Laboratoire de Thermique Énergétique et Procédés, University of Pau, France (LaTEP) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA] – Université de Pau et des Pays de l'Adour BP 1155 64013 PAU, France

² Laboratoire de Thermique Énergétique et Procédés, University of Pau, France (LaTEP) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA] – Université de Pau et des Pays de l'Adour BP 1155 64013 PAU, France

Le stockage thermique stratifié permet de pallier en partie l'intermittence de la ressource solaire dans une centrale solaire thermique, et ainsi mieux satisfaire la demande en chaleur et diminuer l'utilisation de ressources fossiles. Dans la plupart des systèmes actuellement en fonctionnement, la charge du stockage n'est effectuée qu'en cas de surplus de chaleur produite par rapport à la demande, et sa décharge dès lors que la production solaire est insuffisante. Une première étude a montré que la gestion du stockage peut être améliorée grâce à l'optimisation dynamique, qui détermine les trajectoires optimales des variables de contrôle de la centrale (débits ou températures) grâce à une vision stratégique à quelques jours (planification). L'objectif est de réduire les coûts d'opération de la centrale et aussi d'éviter des surchauffes dans le champ solaire, en utilisant des prévisions météorologiques et de demande en chaleur. Ces prévisions sont incertaines, c'est pourquoi l'optimisation dynamique en temps-réel (DRTO) a été testée pour corriger les trajectoires déterminées préalablement. Au vu de l'utilisation en temps-réel, les temps de calcul de cette étape doivent être très rapides, ce qui impose un horizon de temps plus court, réduisant la vision stratégique. La gestion du stockage au niveau de la DRTO et le lien entre la planification et la DRTO ont donc été étudiés. Cela a montré l'intérêt de combiner les deux niveaux d'optimisation dynamique pour utiliser au mieux le stockage thermique dans deux scénarios d'étude.

Mots-Clés: optimisation dynamique en temps, réel, stockage thermique, solaire thermique

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: sylvain.serra@univ-pau.fr

Prise en compte des effets d'entrée et de convection naturelle dans la modélisation 1D des systèmes de stockage thermocline de type dual média

Armand Korsaga ^{*† 1}, Benoit Stutz^{‡ 1}

¹ Université Savoie Mont Blanc (USMB [Université de Savoie] [Université de Chambéry]) – Université Savoie Mont Blanc, locie, Laboratoire LOCIE, Polytech Annecy – 27, rue Marcoz - 73000 Chambéry, France

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

La plupart des modèles numériques permettant de décrire le fonctionnement de ces systèmes au cours du temps sur plusieurs cycles se limitent à la description 1D des transferts dans la partie lit de roche. Ils résolvent l'équation de la continuité et de l'énergie sur la partie fluide, ainsi que l'équation de la chaleur dans le lit de roche et la paroi. L'équation de la quantité de mouvement n'étant pas résolue, ces modèles ne traitent pas de la partie liquide contenu dans le distributeur, ni des configurations où la convection naturelle se développe. La présente étude a pour objectif d'améliorer la prédiction des performances du système en tenant compte de ces phénomènes. Pour se faire, une simulation CFD sur Comsol est faite pour quantifier les effets de turbulences et de mélange provoqué par l'injection du fluide ou le développement de la convection naturelle. Les effets de de-stratification sont ensuite pris en compte dans la modélisation 1D au travers du coefficient de diffusivité turbulente fonction de nombres adimensionnels tel que le nombre de Reynolds et de Grashov.

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

Mots-Clés: Stockage thermique thermocline, modélisation

*Intervenant

†Auteur correspondant: armandkorsaga1@gmail.com

‡Auteur correspondant: benoit.stutz@univ-smb.fr

MICRO PUMPED STORAGE HYDROPOWER An Installation Coupled with Solar Energy

Agustin Brianese * ¹, Alejandro Paz Castro * [†] ¹, Kyllian De Amaro[‡] ¹,
Lucas Caredda Sallier[§] ¹

¹ Solar Academy Graduate School (Solar Academy Graduate School) – LOCIE, Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR5271, F- 73376 Le Bourget du Lac, France – Université Savoie Mont Blanc Polytech Annecy-Chambéry Bâtiment Hélios, 60, rue du lac Léman, France

The increasing penetration of renewable energy sources into the grid demands efficient and flexible storage solutions to ensure energy availability and stability. Pumped Storage Hydropower (PSH) offers a mature and efficient energy storage method, particularly well-suited to hybridization with intermittent sources such as solar photovoltaics (PV). This study investigates the technical feasibility of a micro-PSH system integrated with a solar installation, designed to help flatten peak consumption periods in Bourget-du-Lac, France.

The proposed system uses a closed-loop PSH configuration located at La Dent du Chat, featuring a head height of 1200 meters and designed to supply 6 MW of power over a 4-hour period by releasing 10,000 m³ of water. A Python-based hydraulic model was developed to simulate power generation dynamics and optimize system parameters, such as flow rate, reservoir sizing, and piping losses. Turbine and pump specifications were derived based on these simulations, with the pump system designed to operate within a 6-hour recharge window during low-tariff periods.

To offset the energy consumption of the pumping process, two solar installation scenarios were explored using Archelios software: one with monofacial and another with bifacial PV modules. Both designs, with ~ 244 kWp installed capacity, were assessed for annual production, economic performance, and structural feasibility using SkyCiv under Eurocode-compliant snow and wind loading conditions. Results and recommendations are discussed.

This work demonstrates the potential of hybrid PSH–solar systems for regional energy management and underscores the importance of detailed modeling and site-specific constraints in the design of energy infrastructure.

Acknowledgment: The authors thank Prof. Christophe Ménézo and Prof. Anna Lushnikova for his guidance, as well as the supporting company for valuable input. Authors thank the French National Research Agency, through the Investments for Future Program (ref. ANR-18-EURE-0016 - Solar Academy).

Mots-Clés: Pumped Storage Hydropower, Hybrid Energy System, Solar Integration, Energy Storage

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: alejandro.paz-castro@etu.univ-smb.fr

[‡]Auteur correspondant: kyllian.de-amaro@etu.univ-smb.fr

[§]Auteur correspondant: lucas.caredda-sallier@etu.univ-smb.fr

Prévisions probabilistes de la ressource solaire : intérêt des approches hybrides et résultats d'un exercice de benchmark

Philippe Lauret * ¹, Josselin Le Gal La Salle ¹, Mathieu David ¹

¹ Laboratoire PIMENT – Université de la Réunion – France

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la *Tâche 16 du programme IEA PVPS* (" *Photovoltaic Power Systems* ") dédiée aux ressources solaires pour des applications à forte pénétration et à grande échelle. Il vise à évaluer la qualité des prévisions probabilistes d'irradiance solaire à court terme (intra-heure et intra-journée), un domaine encore peu exploré malgré son importance croissante pour une meilleure intégration du photovoltaïque dans les réseaux électriques.

Une revue de la littérature met en évidence l'absence de comparaison normalisée entre différentes méthodes de prévision probabiliste, notamment en fonction du type de données d'entrée (mesures au sol, données satellitaires, prévisions météorologiques numériques). Pour combler cette lacune, cinq équipes issues du réseau IEA PVPS T16 ont conçu un exercice de benchmarking inédit, basé sur un jeu de données commun couvrant huit sites européens aux climats variés.

Chaque participant a soumis des prévisions probabilistes d'irradiance globale horizontale (GHI) sous forme de quantiles pour des échéances allant de 15 minutes à 6 heures. Trois grandes approches ont été testées : les méthodes fondées sur les données satellite, les modèles en deux étapes (prévision déterministe suivie d'un post-traitement statistique), et les méthodes directes générant les quantiles à partir des données d'entrée.

L'évaluation repose sur le score CRPS (*Continuous Ranked Probability Score*), couramment utilisé pour juger la pertinence des prévisions probabilistes. Ce score est accompagné de sa décomposition en fiabilité et résolution, ainsi que d'un score de compétence (CRPSS) comparant chaque méthode à un modèle de référence climatologique (CSD-CLIM).

Les résultats montrent que la meilleure performance est obtenue par la méthode combinant une prévision point issu du mélange de plusieurs sources (mesures, satellite, prévisions météo) avec un post-traitement par la technique Analog Ensemble. Cette approche, mise en œuvre par Fraunhofer ISE, atteint des scores de performance élevés (CRPSS de 46 % en intra-heure et 32 % en intra-journée). En comparaison, les approches utilisant uniquement des données au sol ou des modèles paramétriques montrent une efficacité plus limitée, en particulier pour les prévisions au-delà de 2 heures.

L'étude démontre également l'intérêt d'utiliser une prévision point construite à partir de plusieurs sources de données comme base pour les prévisions probabilistes, comparé à des méthodes directes. Trois techniques statistiques supplémentaires (GARCH, LQR, QRF) combinées à cette prévision point confirment l'amélioration des performances obtenues par cette approche hybride. En conclusion, ce benchmark coordonné par la Tâche 16 du programme IEA PVPS met en évidence les avantages significatifs d'une stratégie combinant intelligemment différentes sources de données et un traitement statistique robuste pour produire des prévisions probabilistes fiables

*Intervenant

de l'irradiance solaire à court terme.

Mots-Clés: Prévision probabiliste solaire, Benchmarking, CRPS, modèles hybrides

Hybridation des systèmes de conversion de l'énergie solaire : enjeux, leviers et limites.

Alexis Vossier * ¹

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR8521 – 7 rue du Four Solaire Centre Felix Trombe 66120 Odeillo Font-RomeuTecnosud Rambla de la thermodynamique 66100 Perpignan, France

L'association de plusieurs technologies de conversion de l'énergie solaire au sein de systèmes dits *hybrides* suscite un intérêt croissant dans la communauté scientifique. Ces approches visent à maximiser la valorisation du rayonnement solaire en combinant, par exemple, production d'électricité et récupération de chaleur, ou en intégrant des solutions de stockage pour pallier l'intermittence de la ressource. Qu'il s'agisse d'augmenter le rendement global, d'améliorer la gestion énergétique ou de diversifier les vecteurs de sortie, les stratégies d'hybridation ouvrent de nombreuses perspectives.

Cependant, ces systèmes comportent également des écueils majeurs. Une conception ou une optimisation inadéquate peut entraîner une compétition entre les différents sous-systèmes, conduisant à une baisse globale de performance. Par ailleurs, l'exploitation de plusieurs vecteurs énergétiques distincts (par exemple, la chaleur et l'électricité) impose de réfléchir à leur valeur relative, tant sur le plan technique qu'économique. Enfin, la complexité accrue de ces systèmes induit des coûts supplémentaires, qui doivent être évalués au regard des bénéfices réels de l'hybridation. Cette présentation proposera, dans un premier temps, une synthèse critique des principales stratégies d'hybridation solaire identifiées dans la littérature, en mettant en lumière leurs apports, leurs contraintes et leurs domaines d'application. Dans un second temps, nous présenterons des méthodologies d'évaluation visant à quantifier objectivement la pertinence de ces systèmes, en tenant compte à la fois des performances énergétiques et des considérations technico-économiques.

Mots-Clés: Solaire, Hybridation, Evaluation, Systèmes

*Intervenant

Liste des auteurs

AIT OUABD, Jad, 31
Albrand, Pierre, 2
Aldroubi, Zeinab, 33
Alonzo, Gaël, 23
Amara, Mohamed, 33
ARCALIS, LUCAS, 31
Assoa, Y.B., 33

Baltus, William, 17
Barbosa, Séverine, 11
Bennet, Pauline, 7
Bertelot, Olivier, 17
Bonhomme, Marion, 27
Boungou, Idriss, 12
BRIANESE, Agustin, 39
Burrueco-Subirà, David, 2

Caliot, Cyril, 13
CAREDDA SALLIER, Lucas, 39
Carrey, Julian, 9
Changizi, Farzaneh, 28
Chatila-Brunotte, Baptiste, 21
chery, jean, 12
Combroux, Thibault, 2
Cordomi, Marc, 17
CORNET, Jean-François, 4

Dauchet, Jeremi, 4
David, Mathieu, 40
DE AMARO, Kyllian, 39
DIOP, AISSATOU, 5
DJEUMEGNI, Julien, 13

ENNHIRI, Mohamed, 25

Farges, Olivier, 4
Fasquelle, Thomas, 11, 35
Ferriere, Alain, 12
Fricaud, Félix, 21

Gajurel, Ishan, 29
Garcia-Nevado, Elena, 27
Geolle, Lilian, 12
Ginestet, Stéphane, 27
Giraud, Florine, 36

Giteau, Maxime, 21
Gros, Fabrice, 4
Grosjean, Antoine, 5, 7, 23
Guillot, Emmanuel, 15, 17, 19

Haeussler, Anita, 12, 15
Houot, Thomas, 23

Jolly, Claire, 7

Kadoch, Benjamin, 11
Korsaga, Armand, 38

Lachaize, Sébastien, 9
Lahaye, Valentin, 27
Lauret, Philippe, 40
Le Gal La Salle, Josselin, 40
Le Pierrès, Nolwenn, 36
Lesobre, Guilhem, 21
LUU, Marion, 9

Mahammou, Amine, 5, 7
Manca, Michele, 2
Marec, Helene, 2
Martínez Plaza, Diego, 19
menezo, christophe, 28
Mer, Samuel, 13
Ménézo, Christophe, 33

NEROT, Boris, 25

Oms, Claire, 27

Passarelli, Nicolás, 5
Pastor, Eric, 23
PAZ CASTRO, Alejandro, 39
Perez, Antoine, 17
PIETRARU, Marie-Hélène, 9
Plujat, Béatrice, 5, 7
Pruvost, Jeremy, 2

Quoizola, Sébastien, 5, 7

RACHIDI, Hadi, 30
Rodriguez, Régis, 17

SANGLARD, Bastien, 9

Sanglard, Bastien, 11
SERRA, Sylvain, 37
Soum-Glaude, Audrey, 5, 7
Stutz, Benoit, 38

Tessonnaud, Michaël, 17
Teyssot, Olivier, 17
Thebault, Martin, 25, 28, 31
Thomas, Laurent, 5, 7
Titica, Mariana, 2
Toutant, Adrien, 13

Untrau, Alix, 37

Vaillon, Rodolphe, 4
VOSSIER, Alexis, 42
Vossier, Alexis, 21
Vourc'h, Thomas, 4

YUNUS, Abdul-Gafar Adegoke, 36