



JOURNEES NATIONALES SUR L'ENERGIE SOLAIRE - JNES 2022

29 juin - 1^{er} juillet 2022

Centre RAPSODEE - IMT Mines Albi

Planning

Mercredi 29 juin		Jeudi 30 juin		Vendredi 1 ^{er} juillet	
11:00	Départ bus Gare Matabiau / Blagnac aéroport → IMT	8:30	Départ bus Albi centre(*) → IMT	8:30	Départ bus Albi centre(*) → IMT
11:30	Accueil	9:00	Session « Collecte et stratégie de conversion »	9:00	Session « Stockage »
12:30	Repas	10:15	Pause Café - Session Poster - Démo solaire	10:15	Remise des prix meilleur poster
14:30	Ouverture	11:15	Session FedPV « Cellules tandem à base de silicium », Marie-Estelle Gueunier-Farret (GeePs)	10:30	Pause Café
15:00	Plénière, José Gonzalez- Aguilár (IMDEA)	11:45	Photo de groupe	11:00	Visite RAPSODEE plate-forme VALTHERA
16:00	Pause Café - Session Poster - Démo solaire	12:00	Repas	12:00	Conclusions
17:00	Point appel à projets PEPR, Jean-François Guillemoles (IPVF)	13:30	Session « Photo-Procédés »	13:00	Repas à emporter
17:30	Session « Bâtiments et villes solaires »	14:30	Session « Concentration et solaire thermodynamique »	14:00	Départ bus IMT → Gare Matabiau / Blagnac aéroport
18:45	Cocktail	15:45	Pause Café - Session Poster		
20:00	Départ bus IMT → Albi centre(*)	16:00	Discussion inter-axes		
		16:45	Discussion par axe		
		17:30	Départ bus pour visite guidée d'Albi		
		20:00	Dîner de gala		

(*) Vers la Place du Vigan, à proximité des hôtels Ibis

Table des matières

Planning	ii
Mercredi 29 juin 2022	
Bâtiment et villes solaires	5
Présentations orales	5
Etude numérique de la pertinence d'un système de dalle ventilée pour le refroidissement de locaux tertiaires en été., Clément Nevers <i>et al.</i>	7
Impression numérique sur verre : méthode d'optimisation et de contrôle du compromis entre esthétique et performance pour le BIPV, Benjamin Riedel	9
Modélisation thermique en milieu urbain, Florent Retailliau <i>et al.</i>	10
Posters	10
Etude expérimentale des propriétés thermo-physiques de pavés rafraîchissants pour l'atténuation d'îlots de chaleur urbains, Youssef Wardeh <i>et al.</i>	11
Etude numérique de l'impact de différentes solutions de rénovation sur le confort thermique d'été, Lucas Estay <i>et al.</i>	12
Mise en œuvre d'une méthode numérique pour l'intégration du comportement hygrothermique des parois de bâtiment dans un modèle de climat urbain, Margot Ruiz <i>et al.</i>	14
Développement des machines thermiques pour la trigénération intelligente d'énergie, Flavia Longo De Araujo <i>et al.</i>	16
Etude du Potentiel Solaire d'un Territoire Urbain-Rural Montagneux, Apolline Ferry <i>et al.</i>	18

Détection des systèmes solaires photovoltaïque et thermiques en toiture : Cas de la France métropolitaine, Benjamin Govehovitch <i>et al.</i>	19
GIS-based urban morphological studies and clustering techniques to investigate urban solar potential and microclimate at the city scale, Alessia Boccalatte <i>et al.</i>	20
Jeudi 30 juin 2022	
Optimisation de la collecte et stratégie de conversion de la ressource	23
Présentations orales	23
Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque et interprétation physique renouvelée à l'aide d'espaces de chemins, Thomas Villemin <i>et al.</i>	25
Technologies hybrides PV/CSP: état des lieux, défis et perspectives, Alexis Vossier	27
Estimation de l'impact des aérosols sur la ressource solaire en Europe de l'Ouest, Julien Sablon <i>et al.</i>	28
Posters	29
Optimisation dynamique en temps réel de systèmes thermiques multi-énergie incluant le solaire thermique, Thomas Colin De Verdier [et al.]	30
Caractérisation et classification de l'éclairement énergétique d'un site, Josselin Le Gal La Salle <i>et al.</i>	32
PV panels reconfiguration technique under Partial Shading Conditions, Chuanyong Shao <i>et al.</i>	34
Analyse multicritère de l'efficacité de différents modes de récupération de l'énergie solaire dans le bâtiment, Hafsa Fares <i>et al.</i>	36
Pertes énergétiques dues à l'encrassement des systèmes PV en fonction de la zone géographique et du climat, Sébastien Arbaretaz <i>et al.</i>	38
Cube radiométrique pour estimation précise des rayonnements direct, diffus : calibration, modélisation et validation, Mahery-Henintsoa Andriamahefa <i>et al.</i>	40
New comprehensive correlations for best tilt of East to West oriented solar surfaces in France and Italy, Fossa Marco <i>et al.</i>	42
CLÉ-DE-SOL : vers une meilleure maîtrise du flux solaire concentré et de la température au foyer de la centrale à tour Thémis et du four solaire de 1000 kW à Odeillo, Emmanuel Guillot <i>et al.</i>	43

Predictive models for the diagnostics and monitoring of large PV plants from electric parameter measurements and aerial thermal imaging, Parenti Mattia <i>et al.</i>	45
Développement sous TRNSYS d'un outil de prédiction d'une centrale solaire photovoltaïque en milieu rigoureux , Daha Hassan Daher <i>et al.</i>	46
Photo-procédés	47
Présentations orales	47
Ingénierie de la production d'hydrogène solaire par photosynthèse artificielle, Jeremi Dauchet <i>et al.</i>	49
Propriétés radiatives de photocatalyseurs Charbon-Actif/TiO2 en suspension : Effets de la composition sur le transfert radiatif en photoréacteur., Enrique Ribeiro <i>et al.</i>	50
Posters	52
Etude d'une réaction de photooxygénation avec sensibilisateur soluble et supporté dans des photoréacteurs continus microstructurés éclairés par des LEDS visibles, Robbie Radjagobalou <i>et al.</i>	52
Production de carburants solaires par photosynthèse artificielle en photoréacteur : Application à l'hydrogène, Guillaume Foin <i>et al.</i>	54
Concentration et solaire thermodynamique	57
Présentations orales	57
Modélisation d'un collecteur solaire à absorption volumique utilisant des nanoparticules de carbone dispersées dans l'eau., Miguel Sainz Manas <i>et al.</i>	59
Co-optimisation de la stratégie de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration et d'une centrale solaire plan hybridées avec une chaudière biomasse pour la production de chaleur industrielle à deux niveaux de température, Simon Kamerling	61
Optimisation de centrales solaires à concentration: calcul de sensibilité par Monte Carlo et couplage avec un algorithme à descente de gradient, Zili He <i>et al.</i>	63
Posters	63
Influence de l'orientation d'un réseau de concentrateurs linéaires Fresnel sur leurs performances optiques : le cas de la centrale solaire eLLO, Edouard Montanet <i>et al.</i>	64

Vendredi 1^{er} juillet 2022	
Stockage et gestion de l'intermittence	67
Présentations orales	67
Configuration optimization of multi-layered thermocline storage system for green-house by phase change material fillers, Baoshan Xie <i>et al.</i>	69
Systèmes de stockage d'énergie par CO2 comprimé : état de l'art et perspectives, Florent Dewevre <i>et al.</i>	70
Procédé thermochimique hybride : problématique du couplage entre réacteur thermochimique et expandeur, pour la conversion en froid et électricité de source basse température, Hasan Ghazale <i>et al.</i>	71
Posters	72
Etude expérimentale d'un échangeur-stockeur avec matériaux à changement de phase pour la production d'eau chaude sanitaire, Maxime Thonon <i>et al.</i>	73
Large scale thermochemical energy storage prototype using ettringite-based material, Noé Beaupere <i>et al.</i>	75
Séchoir solaire avec stockage thermique de type thermocline, Salifou Tera <i>et al.</i>	76
Évaluation de la performance exergetique lors du cyclage d'un stockage de type thermocline intégré à une centrale solaire thermodynamique, Quentin Falcoz <i>et al.</i>	77
Etude expérimentale d'un démonstrateur de valorisation de l'énergie solaire thermique des routes pour les besoins des bâtiments, Prince Sevi <i>et al.</i>	79
Projet CHATO : des matériaux de stockage thermique locaux en Occitanie, Charles Devise <i>et al.</i>	80
PModeling of local energy resource potential: Identification of the energy vector combination, Nader Koubaytri <i>et al.</i>	82

Bâtiment et villes solaires

Etude numérique de la pertinence d'un système de dalle ventilée pour le refroidissement de locaux tertiaires en été.

Clément Nevers * ¹, Matthieu Labat[†] ¹

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

Les dalles ventilées sont des systèmes thermiques utilisées pour offrir un confort intérieur en profitant de la forte inertie thermique. Bien que celles-ci permettent de déphaser la production de froid avec son utilisation, le retard qu'elle induisent rend difficile le contrôle du système associé. Pour cette raison, les méthodes de contrôle classiques, par exemple une loi d'air 5 points ou un correcteur PID, ne sont pas appropriées et doivent être remplacées par des méthodes avancées, dont le contrôle prédictif. Cette dernière technique consiste à modéliser les transferts de chaleur à l'échelle du local sur une fenêtre temporelle de prédiction, ici 24h. Ensuite, un algorithme d'optimisation est utilisé pour trouver la commande minimisant une fonction de coût. Il s'agira d'établir le meilleur compromis entre maîtrise de la température intérieure et coût énergétique. Dans ce cas présent, l'étude se concentrera sur un bureau, d'étage intermédiaire, et dont une face seulement est exposée à l'environnement. Par le passé, une première étude a permis de proposer un modèle réduit de dalle ventilée sous Matlab/Simulink. Cette dernière se table sur l'identification de fonctions de transfert, combinées dans un modèle d'état, afin d'obtenir les principaux flux de chaleur se développant dans la pièce. Une seconde étude a ensuite démontré la faisabilité d'un contrôle prédictif à l'aide d'un algorithme génétique développé sous Matlab spécifiquement pour ce problème.

En se limitant au seul environnement de modélisation qu'est Matlab, le traitement du problème arrive vite à des limites quand il s'agit de développer un modèle physique réaliste. Pour cela, il existe d'autres environnement de modélisation, dont TRNSYS, contenant des bibliothèques dédiées à la simulation de système thermiques. L'idée est donc ici d'établir une co-simulation, appliquée au système de dalle ventilée, entre les deux environnements de simulation que sont Matlab et TRNSYS. Ce concept repose sur le fait qu'il est préférable d'utiliser plusieurs logiciels spécifiques plutôt qu'un seul essayant de répondre à tous les objectifs simultanément. Dans la présente étude, il s'agit donc de faire communiquer le modèle prédictif établi sur Matlab avec un modèle du système dans TRNSYS. Ainsi, un modèle de CTA couplé à un modèle de bâtiment est construit sur TRNSYS en s'appuyant sur un modèle déjà existant et validé expérimentalement. Celui-ci sera reconstruit intégralement et adapté au présent système. Il y intègre des paramètres réels, tels que des coefficients de performance issus de données commerciales. Le modèle accueille également le modèle d'état représentant la dalle ventilée.

Grâce à la co-simulation et au modèle TRNSYS établi, la présente étude explore le comportement dynamique du système dans différentes configurations. Ainsi, une étude paramétrique est mise

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: m_labat@insa-toulouse.fr

en œuvre afin d'évaluer l'impact des charges thermiques dues à l'ensoleillement. Un nombre de 10 scénarios a été établi, alliant différentes zones climatiques, orientations ou surfaces vitrées. Pour chaque situation, une analyse de flux sera réalisée et couplée à une analyse du comportement de la dalle ventilée. Chaque cas statuera sur l'apport ou non d'une dalle ventilée face au maintien du confort intérieur et du coût énergétique.

Mots-Clés: Dalle ventilée, inertie thermique, confort d'été, cosimulation, consommation d'énergie

Impression numérique sur verre : méthode d'optimisation et de contrôle du compromis entre esthétique et performance pour le BIPV

Benjamin Riedel * ¹

¹ LOCIE (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc, locie, Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) - Grenoble – 50 avenue du Lac Léman, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

Dans le contexte de transition énergétique actuel, l'intégration esthétique des modules BIPV est un élément important dans la conception des bâtiments et doit donner davantage de possibilités à leurs acteurs. De nouvelles stratégies d'optimisation du compromis entre esthétique et performance énergétique sont donc étudiées. Dans ces travaux, la technologie d'impression numérique sur verre est abordée car elle donne de grandes libertés artistiques tout en permettant un contrôle de la performance énergétique des dessins. En effet, grâce à des méthodes de tramages il est possible de contrôler le compromis entre couleur et production d'énergie. Une caractérisation optique et énergétique des encres primaires utilisées par l'imprimante a été réalisée et donne un classement des performances de chacune. Ainsi, une méthode d'optimisation énergétique peut être élaboré pour un dessin donné. En utilisant plusieurs tramages d'encres primaires pures juxtaposés, il est possible de créer une couleur tout en minimisant les pertes énergétiques. Chaque encre montre également des absorbances différentes qui ont un impact important sur l'échauffement du module PV. L'épaisseur de l'encre permet également de jouer sur cet impact thermique mais aussi sur la présence d'une couleur (saturation) ,ainsi que sur la transmittance globale. L'ensemble de ces résultats peuvent être présentés sous forme de poster.

Mots-Clés: BIPV, esthétique, performance, impression, encres

*Intervenant

Modélisation thermique en milieu urbain

Florent Retailleau ^{† 1}, Vincent Forest ², Cyril Caliot ³

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

² |Més|Star> – |Més|Star> – France

³ 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

L'objectif de l'étude est de lever les verrous des simulations déterministes liés à la taille du maillage et d'ouvrir de nouvelles perspectives de simulations en géométrie urbaine comportant des données spatiales et temporelles complexes (avec de grands rapports d'échelle) pour résoudre de nouvelles questions scientifiques. L'étude est basée sur le développement d'un modèle probabiliste de transferts couplés conducto-radiatif linéarisé et transitoire, incluant des conditions limites de type Robin et un flux solaire direct et diffus. La méthode de Monte-Carlo (MC) est utilisée pour la résolution du modèle probabiliste avec une randomisation des contributions des différents modes de transferts de chaleur à la paroi où s'appliquent une condition de Robin (conduction, convection, rayonnement thermique et solaire). MC permet une résolution précise des échanges de chaleur et une vision des chemins de propagation des sources qui aide à mieux comprendre et prédire les échanges de chaleur en milieu urbain (confort, consommation énergétique). En outre, MC est une méthode massivement parallélisable qui rend théoriquement possible le passage à l'échelle des simulations et des modèles.

Dans la présente étude, nous faisons la preuve de concept de ce passage à l'échelle à l'aide du programme Stardis, un outil libre de simulation numérique de transferts thermiques couplés par méthode Monte-Carlo. (<https://www.meso-star.com/projects/stardis/stardis.html>). Nous présentons ici des résultats préliminaires de températures équivalentes corps noirs en géométries complexe urbaine.

Mots-Clés: Monte Carlo, Transfert thermique, Milieu urbain, modèle numérique

[†]Intervenant

Etude expérimentale des propriétés thermo-physiques de pavés rafraîchissants pour l'atténuation d'îlots de chaleur urbains

Youssef Wardeh * ^{1,2}, Stéphane Ginestet ², Escadeillas Gilles ², Pierre Rahme ¹, Elias Kinab ¹

¹ Université Libanaise – Liban

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

Les îlots de chaleur urbains désignent un phénomène local qui apparaît dans les villes à forte densité. Celui-ci se traduit par une élévation de la température ambiante dans la zone urbaine par rapport à la zone rurale voisine. Le rayonnement solaire joue un rôle important dans ce phénomène, notamment car il est en partie absorbé par les matériaux, notamment les voiries et les parkings. Les pavés rafraîchissants constituent une technique innovante et prometteuse pour atténuer les îlots de chaleur urbains. Les pavés rafraîchissants étudiés dans ce travail, permettent de limiter l'augmentation de la température de surface, grâce à l'évaporation de l'eau conduite à travers les pores capillaires, de la base humidifiée vers la surface exposée au rayonnement solaire. Dans ce travail, une nouvelle corrélation entre la température de surface et les propriétés thermo-physiques des pavés rafraîchissants est présentée. Dans un premier temps, plusieurs pavés poreux en béton ont été caractérisés au travers de leurs propriétés thermo-physiques pouvant être en relation avec l'effet rafraîchissant, notamment l'albédo, la conductivité thermique, l'absorption capillaire, etc. Dans un second temps, ces pavés initialement saturés et alimentés d'une manière continue par l'eau à travers leurs bases ont été exposés au rayonnement solaire extérieur pendant trois jours estivaux ensoleillés et leurs températures de surface ont été mesurées. Pour les pavés drainants, une forte corrélation polynomiale du second degré ($R^2 = 0.945$) a été trouvée entre la température de surface moyenne et le terme qui reflète l'interconnexion de l'eau capillaire à la surface. De plus, il a été remarqué que la température de surface moyenne atteint sa valeur minimale pour une gamme optimale de pores capillaires pour lesquels l'ascension capillaire est plus forte que la gravité. Pour les pavés non drainants, une bonne corrélation linéaire négative ($R^2 = 0.828$) a été obtenue entre la température de surface moyenne et le terme qui exprime la capacité à chauffer l'eau capillaire par la chaleur stockée loin de la surface, et par conséquent la dominance du processus d'évaporation par diffusion. Les derniers essais montrent que ce processus est cependant susceptible d'être perturbé par la résistance du matériau à la diffusion de la vapeur d'eau.

Mots-Clés: îlots de chaleur urbains, pavé rafraîchissant, température de surface, évaporation

*Intervenant

Etude numérique de l'impact de différentes solutions de rénovation sur le confort thermique d'été

Lucas Estay ^{*† 1}, Charbel Abboud ¹, Marion Bonhomme^{‡ 1}, Claire Oms^{§ 1}, Stéphane Ginestet^{¶ 1}

¹ Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions (LMDC) – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse – INSA-UPS 135 Avenue de Rangueil - 31077 TOULOUSE CEDEX, 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. Dans ce contexte, la rénovation représente un enjeu majeur de l'efficacité énergétique et environnementale du parc de bâtiments existant. 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 chauds.

La majeure partie des opérations de rénovations concernent les travaux d'isolation. Or ceci peut être problématique dans un contexte où le confort d'été devient préoccupant. Les apports solaires sont par exemple fortement impactant pour limiter l'inconfort estival.

L'objectif de cette étude est d'estimer la qualité de différentes solutions de rénovations pour le parc de logements toulousain. Les bâtiments simulés sur Energy+ ont été sélectionnés pour être le plus représentatif des caractéristiques du territoire de Toulouse. Ainsi les conclusions obtenues peuvent être étendus au reste du parc. Les simulations ont pour objectif de mettre en avant l'impact de solutions visant à limiter les apports en été, en particulier proposer des solutions efficaces de protections solaires.

Plusieurs scénarios de travaux ont été simulés numériquement et comparés pour obtenir un compromis entre le confort thermique adaptatif et les consommations énergétiques. Plusieurs paramètres ont été testés pour observer l'impact des protections solaires, des types d'isolations, de météo différentes...

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.

*Intervenant

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

‡Auteur correspondant: mbonhomm@insa-toulouse.fr

§Auteur correspondant: oms@insa-toulouse.fr

¶Auteur correspondant: sgineste@insa-toulouse.fr

Mots-Clés: Simulation Thermique Dynamique, Confort thermique estival, Rénovation énergétique

Mise en œuvre d'une méthode numérique pour l'intégration du comportement hygrothermique des parois de bâtiment dans un modèle de climat urbain

Margot Ruiz * ^{1,2}, Marion Bonhomme * ¹, Valéry Masson * ², Stéphane Ginestet * ¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse – INSA, LMDC de Toulouse – France

² CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse – CNRM, Météo-France – France

La complexité morphologique des centres historiques les rend particulièrement vulnérables au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). De très nombreuses études ont mis avant différentes stratégies d'atténuation du phénomène d'ICU, mais elles ne sont pas toutes applicables dans le contexte des centres historiques. Un levier d'action pertinent dans ce contexte est la rénovation des bâtiments actuellement peu isolés, en tenant compte des contraintes patrimoniales et du comportement hygrothermique complexe des matériaux anciens. Pour cela, la stratégie de rénovation privilégiée est l'isolation à partir de matériaux bio-sourcés. Les modèles urbains comme TEB (Town Energy Balance) permettent d'évaluer à l'échelle de la ville les consommations énergétiques ainsi que le confort intérieur et extérieur. Actuellement, le modèle TEB considère les propriétés radiatives et thermiques des matériaux mais pas les transferts hydriques dans les parois. Des modèles permettant d'évaluer les transferts couplés de chaleur et d'humidité existent. Cependant, leur résolution numérique se fait par des méthodes complexes et itératives, qui ne sont pas adaptées aux modèles à l'échelle urbaine. Ce travail propose une simplification du schéma de résolution numérique des transferts couplés et une adaptation des échelles de résolution spatio-temporelles, pour les intégrer aux modèles urbains. Cette méthode est validée en deux temps : numériquement et expérimentalement. Les résultats sont comparés à ceux d'un modèle de référence Delphin pour quinze parois composées de différents types de matériaux et dans plusieurs climats. Les résultats sont également confrontés aux données mesurées expérimentalement dans un living-lab à Cahors. L'instrumentation des bâtiments permet de mesurer les conditions hygrothermiques de l'ambiance intérieure et en plusieurs points des parois anciennes rénovées. De plus, une station météorologique installée dans le quartier médiéval de Cahors enregistre les données météorologiques dont la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire, la quantité de précipitations, la vitesse et la direction du vent. Le calcul des flux radiatifs à courtes et grandes longueurs d'onde incidents à une façade, est réalisé à partir de l'outil EnergyPlus, ce qui permet de tenir en compte de l'environnement urbain complexe de ce quartier médiéval. De plus, une stratégie de co-simulation de plusieurs bâtiments du quartier a été développée pour quantifier les échanges infrarouges entre les bâtiments. Les perspectives de ce travail sont d'intégrer les transferts hydriques dans les parois avec une méthode de résolution numérique optimale au modèle TEB et de réaliser des simulations énergie-climat intégrant le comportement hygrothermique des parois anciennes et biosourcées. Un des objectifs est d'évaluer le

*Intervenant

potentiel évaporatif des parois anciennes pour abaisser les températures intérieures et extérieures, en fonction des conditions météorologiques et plus particulièrement de la pluie et du rayonnement solaire.

Mots-Clés: simulation thermique urbaine, comportement hygrothermique, îlot de chaleur urbain, centres historiques

Développement des machines thermiques pour la trigénération intelligente d'énergie

Flavia Longo De Araujo * ¹, Stephanie Giroux-Julien ¹, Eric Albin ¹

¹ CETHIL – Université Claude Bernard-Lyon I - UCBL (FRANCE) – France

BS1 : Systèmes combinés et gestion intelligente de l'énergie

En France, le bâtiment représente 44% des dépenses énergétiques dont 65% pour le chauffage. Afin de lutter contre le dérèglement climatique et renforcer son indépendance énergétique, la loi TECV 2015 a comme objectif la réduction de la consommation des énergies fossiles et l'augmentation de la participation des énergies renouvelables. Dans ce contexte, une solution innovante est développée pour permettre une gestion plus intelligente des énergies, en particulier dans le bâtiment.

Tel un duplex Stirling, le système développé est une machine thermique régénérative (RTM) permettant la trigénération d'énergie : chaleur, froid et électricité. La trigénération intelligente consiste à adapter la production de ces énergies à la demande pour combiner les avantages des pompes à chaleur régénératives et de la cogénération. Une analyse thermodynamique est réalisée pour mettre en évidence les bénéfices de cette technologie non existante sur le marché.

La technologie étudiée utilise un mélange d'énergies primaires qui peuvent être d'origine fossile (gaz naturel, fioul) ou renouvelable (solaire, granulés de bois, biogaz, biofioul, géothermie). La récupération de calories gratuites de l'environnement permet de réduire la consommation primaire d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. La gestion intelligente des énergies peut également réduire la facture énergétique en produisant une électricité à haute valeur ajoutée. Une étude technico-économique est présentée pour estimer l'impact écologique et économique de cette technologie par rapport à des systèmes de chaudières à condensation, micro-cogénération ou pompe à chaleur électrique.

Une autre application qui consiste à coupler ce système à une production photovoltaïque est également discutée et analysée d'un point de vue thermodynamique. La trigénération est utilisée en mode récepteur (excédent solaire) pour stocker l'énergie électrique sous forme thermique à haute température en cogénérant également du froid. Le cycle de trigénération est alors inversé en mode moteur pour reconverter l'énergie thermique stockée en électricité.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR DAVinCCHeaP(1) dont l'objectif principal de ce projet est le développement d'un banc d'essai de sous-composants pour élargir les connaissances fondamentales, construire des bases de données et fournir des extrapolations pour les RTM semi-industrielles, en particulier pour la pompe à chaleur Vuilleumier. Les données acquises permettront de construire un modèle numérique qui servira de base solide pour la conception des futures RTMs.

*Intervenant

(1) Advanced Design of Vuilleumier for INtelligent Combined Cooling, Heat and Power

Mots-Clés: machines thermiques régénératives, trigénération, Stirling, Vuilleumier, bâtiment, solaire

Etude du Potentiel Solaire d'un Territoire Urbain-Rural Montagneux

Apolline Ferry * ¹, Christophe Menezo ², Lamia Berrah ³

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

² 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

³ LISTIC – Université Savoie Mont Blanc – France

Le développement des énergies renouvelables est urgent compte tenu du contexte climatique et énergétique actuel. Parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire est prometteuse et les technologies solaires se sont répandues rapidement ces dernières années. L'autoconsommation est possible avec les technologies solaires (thermiques et photovoltaïques) et doit être encouragée dans les prochaines années afin de limiter les pertes induites par le transport de l'énergie. Cependant, le potentiel solaire est complexe à modéliser avec précision, car de nombreux phénomènes l'impactent (ombrage, masques lointain...). Ce travail propose une méthodologie pour cartographier le potentiel solaire dans une zone rurale, en considérant plusieurs aspects tels que le climat local, la topographie et le changement climatique global. Elle présente un premier aperçu du workflow développé, qui combine plusieurs logiciels afin d'étudier le potentiel solaire et son influence sur le mix énergétique à l'échelle d'un village situé en zone rurale. En particulier, l'accent est mis sur les régions montagneuses qui sont des zones isolées avec de fortes contraintes environnementales. Ce travail présentera un état de l'art, les outils qui seront utilisés et le territoire qui sera étudié.

Mots-Clés: potentiel solaire, énergies renouvelables, mix énergétique, territoire rural, modélisation énergétique

*Intervenant

Détection des systèmes solaires photovoltaïque et thermiques en toiture : Cas de la France métropolitaine

Benjamin Govehovitch ¹, Martin Thebault ^{*† 1}, Christophe Menezo ¹

¹ LOCIE – Université de Savoie – France

L'adoption massive de la technologie solaire sur les bâtiments nécessite de réaliser un état des lieux à grande échelle du potentiel existant. Celui-ci doit permettre d'évaluer le potentiel de production déjà installé ainsi que de définir le potentiel encore exploitable d'un point de vue technique et économique. Le deep learning s'avère être un outil tout indiqué dans ce but, et son essor ainsi que la disponibilité d'images satellites de hautes résolutions sur de grands territoires peuvent contribuer à l'évaluation du potentiel solaire des toitures de bâtiments à grande échelle. Les travaux présentés ici visent à évaluer le potentiel solaire des toitures de bâtiment sur tout le territoire de la France métropolitaine. Ils font appel à deux modèles de traitement d'images par machine learning : un modèle de classification d'images et un modèle de segmentation sémantique. Le premier vise à catégoriser les toitures, selon leur équipement - ou non - d'installations solaires (photovoltaïque ou thermique) ; le deuxième permet, quant à lui, d'évaluer la surface de la toiture couverte de ces installations, et ainsi la puissance que peut générer le bâtiment. Les résultats de ces travaux peuvent être facilement transmis aux collectivités territoriales sous forme de fichiers de systèmes d'informations géographiques (GIS).

Mots-Clés: Potentiel solaire, machine learning, deep learning

*Intervenant

†Auteur correspondant: martin.thebault@univ-smb.fr

GIS-based urban morphological studies and clustering techniques to investigate urban solar potential and microclimate at the city scale

Alessia Boccalatte * ¹, Christophe Ménézo * ^{† 2}, Martin Thebault * ^{‡ 3},
Julien Ramousse * ^{§ 4}, Marco Fossa * ^{¶ 5}

¹ Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement – Université Savoie Mont Blanc : UMR5271 / FRE3220, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Chaire INSA/EDF, Habitats et Innovations Energétiques – Chaire INSA – France

³ LOCIE – Université de Savoie – France

⁴ Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) – Centre National de la Recherche Scientifique, Université Savoie Mont Blanc : UMR5271 – France

⁵ DIME - Dipartimento di Ingegneria meccanica energetica gestionale e dei trasporti (Università degli Studi di Genova) (DIME (UNIGE)) – Italie

The exploitation of renewable resources, is one of the key goals of the EU regulation toward energy transition in urban areas. The concepts of Nearly Zero Energy Building (NZEB), or District (NZED), have helped to develop more awareness on on-site energy production issues. The evaluation of the solar energy potential and the study of the urban microclimate at the city scale is thus fundamental to support municipalities and designers regarding climate action plans for modern cities. In this context, the presented studies concern the development of GIS-based methodologies relying on urban morphological analyses and clustering techniques to investigate the urban solar potential and microclimate at the city scale. Concerning urban solar potential, a general methodology to assess the impact of urban form on solar harvesting is here presented. The developed approach aims at extracting meaningful morphological parameters at a very large scale. The rooftop overall shading rate (I^*) is defined as a benchmark, and it is measured through a scaled insolation representing the ratio between the insolation of a surface within the urban context and its unshaded theoretical maximum (I^* is set equal to the unity in unshaded conditions). A set of 40 morphological features is calculated for 60,000 buildings in the Canton of Geneva (Switzerland), and the scaled solar insolation of about 350,000 roof pieces is derived from the Solar Cadaster of Geneva. The results outline the insolation distribution within the city and the correlations between the overall rooftop shading rate (I^*) and the selected urban morphological features. The second analysis is related to the study of the urban local climate and the related microclimatic phenomena (Urban Heat Island) by means of detailed morphological analyses of the urban context and clustering techniques. Differently from the traditional Local Climate Zone (LCZ) approach, a new GIS-based methodology relying on KMeans clustering is here developed in order to systematically identify and group homogeneous morphological areas within the city. The Urban Weather Generator (UWG) model is used to

*Intervenant

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

[‡] Auteur correspondant: martin.thebault@univ-smb.fr

[§] Auteur correspondant: Julien.Ramousse@univ-savoie.fr

[¶] Auteur correspondant: marco.fossa@unige.it

evaluate the intensity of the Urban Heat Island (UHI) for the different morphological areas, thus allowing to create a local microclimate map of the whole city as a function of the urban morphology (average building height, horizontal density, vertical to horizontal ratio, ...) and district design (vegetation coverage, surface albedo, anthropogenic heat from traffic, building envelope heat transfer coefficients, ...).

Mots-Clés: Urban Morphology, Urban Solar Potential, Urban Microclimate, KMeans Clustering

Optimisation de la collecte et stratégie de conversion de la ressource

Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque et interprétation physique renouvelée à l'aide d'espaces de chemins

Thomas Villemin ^{*† 1,2}, Jean-François Cornet ³, Jeremi Dauchet ³, Olivier Farges ¹, Rodolphe Vaillon ⁴, Thomas Vourc'h ³, Daniel Yaacoub ³

¹ Université de Lorraine, Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7563 / URA875 – Université de Lorraine - ENSEM - ESSTIN, 2 avenue de la Forêt de Haye, TSA 60604, 54518 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France

² Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement - Direction Est (Cerema Direction Est) – Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – 71 rue de la Grande Haie - 54510 TOMBLAINE, France

³ Institut Pascal, axe GePEB (IP) – CNRS : UMR6602 – INSTITUT PASCAL Campus Universitaire des Cèzeaux 4 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière, France

⁴ Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) – Université de Montpellier, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5214 – 860, rue Saint Priest, Bâtiment 5 - CC 05001 -34095 Montpellier Cedex 5, France

Le fonctionnement électrique et thermique d'un panneau photovoltaïque en conditions réelles résulte d'une interaction complexe entre celui-ci et son environnement : intermittence du rayonnement solaire, fluctuations de l'écoulement d'air, ombrages éventuels (1). Cependant, la conception et l'évaluation des performances énergétiques d'une cellule sont évaluées dans les Conditions Standards de Test (STC) correspondant à une situation où le rayonnement solaire incident est de 1000 W/m² (spectre solaire AM-1.5) et à une température de cellule de 25 °C. Ces conditions permettent généralement l'inter-comparaison des nombreuses technologies photovoltaïques entre elles. Il a été toutefois observé que le point de fonctionnement des panneaux photovoltaïques en environnement réaliste est toujours très éloigné des conditions STC (2). Ce constat étant établi, il devient nécessaire de repenser la chaîne de modélisation d'un panneau photovoltaïque dans des conditions de fonctionnement réelles en partant des propriétés physiques de ce dernier jusqu'à une évaluation de sa production électrique (annuelle par exemple). En effet, la stratégie de conception des panneaux pourrait être directement impactée par le choix de l'emplacement final du système et donnerait lieu à une stratégie d'optimisation différente en fonction de la performance énergétique attendue. Cette chaîne de modélisation nécessite de développer des modèles électrique, optique et thermique faisant intervenir des questions de couplage multi-physique multi-échelle.

Dans ce cadre, nous proposons une estimation du courant électrique d'une cellule en s'appuyant sur la méthode de Monte Carlo. Le modèle électrique consiste à écrire les équations de dérive-diffusion pour les porteurs minoritaires, c'est-à-dire les électrons dans la zone P et les trous dans la zone N d'une cellule solaire constituée d'une simple mono-jonction de deux couches dopées,

*Intervenant

†Auteur correspondant: thomas.villemin@univ-lorraine.fr

l'une négativement et l'autre positivement. Le courant total s'exprime comme la somme du photocourant (paires électron-trou photogénérées) et du courant de diode (abaissement de la barrière de potentiel à la jonction PN lorsqu'une tension est appliquée).

Ce courant total est obtenu avec l'écriture et la mise en œuvre de deux processus (marches aléatoires) sur des espaces de chemins inverse (remontée à la source) et direct (départ de la source), qui permettent des analyses variées. Une première étape de couplage hiérarchique du modèle électrique (de cellule) au modèle thermique (du panneau) sera également présentée.

Des bénéfices sont attendus de cette formulation en espace de chemins : images physiques renouvelées, insensibilité des temps de calculs à la dimension du domaine d'intégration et à la complexité géométrique à toutes les échelles, calcul de sensibilité, Monte Carlo symbolique. Ce travail s'insère dans une dynamique forte du groupe EDStar à l'heure actuelle (3), tant au niveau de la question applicative de départ, qu'au niveau méthodologique.

(1) M. Jaszczur, Q. Hassan, J. Teneta, E. Majewska, M. Zych, An analysis of temperature distribution in solar photovoltaic module under various environmental conditions, MATEC Web Conference, (2018), 240

(2) D. Moser, M. Pichler, M. Nikolaeva-Dimitrova, Filtering Procedures for Reliable Outdoor Temperature Coefficients in Different Photovoltaic Technologies, (2014), 136

(3) V. Gattepaille, *Modèles multi-échelles de photobioréacteurs solaires et méthode de Monte Carlo*. 2021. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne (2021). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03600307/document>

Mots-Clés: Photovoltaïque, Méthode de Monte Carlo, comportement thermique

Technologies hybrides PV/CSP: état des lieux, défis et perspectives

Alexis Vossier * ¹

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, 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

Le déploiement massif de l'électricité solaire dans les décennies à venir nécessitera de surmonter un problème de taille : l'absence de pilotabilité des centrales de production d'électricité solaire. Le stockage de l'énergie solaire apparaît donc comme une condition *sine-qua-non* au développement de l'électricité solaire, en offrant une meilleure adéquation entre demande et production, et en simplifiant le déploiement de cette source d'énergie variable au sein du réseau électrique.

Les systèmes hybrides photovoltaïque (PV)/ thermique à concentration (CSP) sont actuellement considérés comme une voie prometteuse vers une production continue d'électricité solaire, peu coûteuse et fiable. Ils bénéficient simultanément du coût réduit et de l'efficacité élevée des cellules photovoltaïques, ainsi que de la capacité de stockage thermique inhérente aux systèmes solaires à concentration thermodynamiques. Ces approches hybrides se déclinent en deux grandes familles impliquant soit 1) l'utilisation d'un récepteur PV haute-température faisant simultanément office de convertisseur photovoltaïque et de récepteur thermique 2) l'utilisation d'un composant optique spécifique assurant une séparation spectrale du rayonnement solaire, et sa redistribution vers l'un ou l'autre des deux convertisseurs en fonction de la longueur d'onde incidente.

Dans cet exposé, on passera en revue les principales motivations justifiant le développement de ces technologies, avant de décrire leur mode opératoire plus en détails. Dans un deuxième temps, on s'attardera sur les verrous scientifiques et technologiques qu'il sera nécessaire de surmonter afin de permettre la mise en œuvre pratique de ces systèmes. En conclusion, on discutera de la capacité des différentes technologies de centrales à assurer une production d'électricité " à la demande ".

Mots-Clés: PV, CSP, systèmes hybrides

*Intervenant

Estimation de l'impact des aérosols sur la ressource solaire en Europe de l'Ouest

Julien Sablon ^{*† 1,2}, Quentin Libois ¹

¹ Centre national de recherches météorologiques (CNRM) – Institut National des Sciences de l'Univers : UMR3589, Météo France, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR3589 – France

² Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO) – Direction générale de l'Armement (DGA) – ISAE - 10 av. Edouard Belin - BP 54032 - 31055 TOULOUSE Cedex 4, France

Les prévisions météorologiques de rayonnement solaire à la surface sont essentielles pour anticiper la production d'énergie solaire, pour les échéances allant de quelques heures à quelques jours. Si la principale difficulté aujourd'hui consiste à prévoir le rayonnement solaire en conditions nuageuses, une mauvaise représentation des aérosols présents dans l'atmosphère limite également la qualité des prévisions. Les modèles opérationnels de prévision numérique du temps, dont ceux développés à Météo-France, s'appuient sur des climatologies mensuelles d'aérosols, pouvant être basées sur des sorties de modèles de chimie-transport ou des observations. L'utilisation de telles climatologies, essentiellement pour des raisons de coût de calcul, implique qu'à un instant donné les aérosols présents dans le modèle ne dépendent que du jour calendaire et sont indépendants de la réalité météorologique. Ainsi, les événements individuels à fort impact tels les pics de pollution, les éruptions volcaniques ou les événements de transport de poussières désertiques ne sont pas représentés, alors qu'ils peuvent avoir des conséquences importantes sur la disponibilité de la ressource solaire. L'objectif de ce travail est de quantifier l'erreur induite par l'utilisation de ces climatologies, sur la prévision du rayonnement solaire mais également sur la prévision de la production photovoltaïque. Le domaine d'étude correspond au domaine couvert par le modèle opérationnel à aire limitée de Météo-France AROME, qui couvre une grande partie de l'Europe de l'Ouest. La période d'étude s'étend d'août 2019 à juillet 2020. Les prévisions AROME à 1h sont utilisées pour accéder à la meilleure connaissance possible de l'atmosphère à un instant donné. A cette information sur les propriétés de l'atmosphère (température, pression, humidité, nébulosité) sont ajoutées diverses représentations des aérosols : la climatologie mensuelle opérationnelle, une climatologie plus récente, des observations satellite ou des prévisions issues d'un modèle de chimie-transport, cette dernière représentation étant considérée comme la plus proche de la réalité. Un modèle de transfert radiatif permet de calculer les flux de rayonnement solaire à la surface (direct, diffus, sur un certain nombre de bandes spectrales) pour ces différentes configurations d'aérosols. Ces flux sont également convertis en production photovoltaïque à l'aide d'un outil dédié. La comparaison des différentes simulations permet de quantifier l'impact absolu des aérosols (par rapport à un cas sans aérosols), ainsi que l'erreur associée à l'utilisation de climatologies par rapport à des produits plus réalistes. Localement les différences sur la puissance photovoltaïque avec un panneau c-Si orienté au sud avec un angle zénithal de 30° peuvent atteindre 108W/m² localement et en moyenne annuelle et spatiale un biais de 0,55 % (moyenne mensuelle maximale en novembre de 1,4 %) et un écart-type de 8,3 % (moyenne mensuelle maximale en juin de 12,1 %) sont mis en évidence. En comparaison,

*Intervenant

†Auteur correspondant: julien.sablon@isae-supero.fr

le forçage maximum lié aux aérosols est localement de $120\text{W}/\text{m}^2$ avec en moyenne annuelle et spatiale un biais de 3,6 % et un écart-type de 14,8 %. Toutes ces données soulignent l'importance de mieux représenter les aérosols dans les modèles de prévision numérique du temps.

Mots-Clés: prévision numérique du temps, aérosols, photovoltaïque, incertitudes

Optimisation dynamique en temps réel de systèmes thermiques multi-énergie incluant le solaire thermique

Thomas Colin De Verdier * ^{1,2}, Sylvain Serra ¹, Sabine Sochard ¹, Pierre Delmas ², Jean-Michel Reneaume ¹

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], Laboratoire de thermique énergétique et procédés, EA1932 – Rue Jules Ferry, 64000 Pau, France

² NEWHEAT – Newheat – 185 Boulevard du Maréchal Leclerc, 33000 Bordeaux, France

L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'optimisation dynamique en temps réel du pilotage d'une centrale thermique multi-énergie renouvelable.

Cette centrale sera composée exclusivement de source de production de chaleur renouvelable, à savoir :

- Un champs solaire thermique composé de capteurs plans (Flat Plate Collector – FPC)
- Des pompes à chaleur à compression mécanique eau/eau et air/eau
- Une chaudière d'appoint à biocombustible

L'objectif étant de couvrir 100% de la demande en chaleur d'un consommateur, le système comportera également des équipements de stockage de chaleur :

- Stockage journalier : cuve d'eau à pression atmosphérique pouvant aller jusqu'à 10.000 m³
- Stockage inter-saisonnier : stockage en fosse (ou pit storage), soit un bassin d'eau isolé thermiquement à sa surface pouvant aller jusqu'à 100.000m³

Le travail porte sur l'optimisation du pilotage, donc du fonctionnement, d'une centrale thermique. Le dimensionnement de cette centrale thermique sera donc prédéfini.

Cette méthode d'optimisation aura pour objectif soit de minimiser le coût de la production de chaleur (livrée au consommateur) soit de maximiser le profit de la centrale, en prenant en compte les coûts d'exploitation (OPEX).

En raison de l'incertitude des prévisions météorologiques, de la variabilité du coût des combustibles (biocombustible et électricité) et de la sensibilité du système à ces variations (le passage d'un nuage affecte directement la production de chaleur solaire), la méthode qui sera développée durant cette thèse s'appuiera sur des algorithmes d'optimisation dynamique en temps réel (DRTO) afin de prendre en compte la variabilité de la ressource solaire ainsi que la dynamique du champ solaire dans le pilotage de la centrale. Cette méthode utilisera les mesures disponibles en temps réel et les prévisions à court terme pour donner des trajectoires optimales aux paramètres de fonctionnement.

Nous envisageons une formulation du problème d'optimisation sous forme d'un problème non-linéaire (NLP) avec un développement des modèles de simulation et d'optimisation dans les

*Intervenant

langages Modelica et Optimica. Deux horizons de temps pour l'optimisation sont envisagés, l'un long terme (1 à 2 an) alimentant un problème d'optimisation court terme (quelques jours).

Ce travail de thèse est réalisé en collaboration avec Newheat, fournisseur de chaleur renouvelable et le LaTEP (Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés) de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA).

A terme, l'outil développé pendant cette thèse a pour vocation à être implémenter sur les centrales de productions de chaleurs de Newheat.

Mots-Clés: Solaire thermique, Chaleur renouvelable, DRTO (Optimisation dynamique en temps réel), Optimica, Modelica, NLP

Caractérisation et classification de l'éclairement énergétique d'un site

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

¹ Laboratoire PIMENT – La Réunion

Afin d'évaluer un modèle de prévision de manière objective, il est recommandé de comparer sa qualité avec celle d'un modèle dit "de référence". Le "Continuous Ranked Probability Score" (CRPS) de la climatologie (ou "UNC") (Brocker, 2007) apparaît comme un bon modèle de référence pour les prévisions probabilistes. Comme il est aussi l'intégrale du "Brier Score" de la prévision climatologique binaire pour tous les niveaux d'éclairement énergétique (Doubleday, 2020), il peut être représenté graphiquement par une aire sur le graphique représentant le Brier Score en fonction du niveau d'éclairement énergétique. Le Gal La Salle et al (2021) ont montré que ce modèle de référence n'est cependant pas adapté pour les prévisions solaires, et ont proposé un nouveau modèle de référence appelé "CSD-CLIM". Les données d'éclairement sont catégorisées selon la valeur de l'irradiance de ciel clair, et le CRPS de la climatologie est calculé séparément pour chacune des catégories ainsi créées. La somme pondérée de tous les "UNCs" ainsi calculés donne la "CSD-UNC" (pour "clear-sky dependant uncertainty"), qui peut aussi être représenté graphiquement et comparé avec l'UNC (Le Gal La Salle et al, 2021). Dans ce travail, nous proposons d'interpréter l'UNC et la CSD-UNC comme des indicateurs de la dynamique temporelle des valeurs d'éclairement énergétique. Nous avons tracé la CSD-UNC de 31 sites répartis sur tous les continents et ayant des conditions météorologiques très différentes. La forme générale du CSD-UNC et sa comparaison avec l'UNC caractérisent l'éclairement énergétique incident d'un site.

Nous avons identifié 4 régimes principaux d'éclairement énergétique, selon la forme du CSD-UNC :

Régime "Lilac leaf" : Le maximum est unique et apparaît pour une faible valeur d'éclairement énergétique. Ce régime est identifié principalement pour des sites continentaux de l'hémisphère nord avec un indice de ciel clair moyen faible. Exemple pour le site de Palaiseau :

Régime "Black alder leaf" : Le maximum est unique et apparaît pour une valeur élevée d'éclairement énergétique. Ce régime est identifié principalement pour des îles tropicales, qui ont une faible UNC mais une forte CSD-UNC. Exemple (site de Fouillole) :

Régime "Oak leaf" : Forme caractérisée par plusieurs minimums et maximums locaux. Ce régime est identifié principalement pour des latitudes tropicales. L'indice de ciel clair moyen est élevé en moyenne, mais très variable. Exemple (site de l'île de Nauru) :

Régime "Sunny" : Valeur faible de CSD-UNC sur une large plage de valeurs d'éclairement énergétique. L'UNC est élevée. L'indice de ciel clair moyen est très élevé. Exemple (site de Desert

*Intervenant

Rock) :

Nous montrons que la forme du CSD-UNC présente des liens forts avec d'autres caractéristiques de l'éclairement énergétique couramment étudiées dans la littérature scientifique comme l'indice de ciel clair moyen, sa variabilité et la localisation du site (Lauret et al, 2016, 2019).

Ce travail propose un nouvel outil d'analyse permettant une meilleure compréhension de l'éclairement énergétique d'un site. Une étude exhaustive permettant d'expliquer les formes obtenues pour les différents régimes identifiés de CSD-UNC semble être une nouvelle étape indispensable pour l'explication et la large diffusion de ce nouvel outil.

Mots-Clés: Outil de diagnostic, caractérisation du GHI, Éclairement énergétique

PV panels reconfiguration technique under Partial Shading Conditions

Chuanyong Shao ^{*† 1}, Anne Migan-Dubois ¹, Demba Diallo ¹

¹ Université Paris-Sorbonne - Paris IV, Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris (GeePs),
Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, Centrale Supélec – 3-11 Rue Joliot-Curie, 91192
Gif-sur-Yvette, France

Photovoltaic technology is a renewable energy with a huge potential to satisfy electricity demands in the world. Moreover, it is easy to implement in urban areas. The author in (1) estimated that up to 32% of the national electricity consumption of Israel can be generated by installing PV systems on all building roofs. However, the authors in (2) have raised a serious issue: the shading by adjacent buildings. This phenomena may occur in large cities where most of the new residential units are being built in high density, medium rise neighborhoods and in high-rise towers.

Indeed, partial shading is the major cause of mismatch losses that can significantly reduce the energy yield of photovoltaic (PV) systems(3). The most usual topologies of PV modules are Series-Parallel (SP), Bridge-Link (BL), Honeycomb (HC) and Total-cross-tied (TCT) configurations. Based on analysis of the literature, the TCT configuration is the one, which has the best output performance under PSCs. However, several other reconfiguration techniques, dynamic or static, are introduced to improve the performance of PV array. The static reconfiguration method normally stands for the TCT connection physically optimized using puzzle solving idea. The dynamic reconfiguration technique changes the electrical connections of the PV array. This study aims to evaluate a proposal to mitigate the PSCs effects on the PV array. The state of art is based on: 1) The comparison of the performance of different PV array configurations under PSCs; 2) The improved PV static reconfiguration technique based on Sudoku (SDK) method.

Figure 1 represents a TCT connected 9x9 PV array, with the distribution of shaded cells before and after the optimization using SDK, respectively. The PV array is modeled with Matlab/Simulink. Figure 2 displays the I-V and P-V simulated curves of the PV array under uniform irradiation (named Uniform), PSCs before SDK optimization (named Initial) and PSCs after SDK optimization (named SDK). Table 1 provides the values of several parameters before and after optimization: The Maximum Power Point (MPP) characteristics, the relative power loss, the fill factor, and the optimization factor. The results show that the reconfiguration reduces the power loss, and improves the fill factor.

Keywords: PV reconfiguration, Partial Shading conditions, Sudoku optimization, I-V and P-V curve

*Intervenant

†Auteur correspondant: chuanyong.shao@centralesupelec.fr

Mots-Clés: PV reconfiguration, Partial Shading conditions, Sudoku optimization, IV and PV curve

Analyse multicritère de l'efficacité de différents modes de récupération de l'énergie solaire dans le bâtiment

Hafsa Fares ^{*† 1,2}, David Chèze ³, Nolwenn Le Pierrès ¹, Etienne Wurtz ³

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

² Université de Savoie Mont Blanc – CEA, LITEN, INES, CEA,LITEN, INES – 73375 Le Bourget du Lac, France

³ Univ. Grenoble Alpes – CEA, LITEN, INES – 73375 Le Bourget du Lac, France

Le marché de l'énergie solaire a fait l'objet de beaucoup de turbulences ces dernières années pour des raisons technologiques, économiques ou encore réglementaires. Les travaux des différents acteurs du domaine ont permis de résoudre la majorité des écueils et il semble aujourd'hui possible de relancer ce gigantesque marché de l'intégration solaire au sein des bâtiments à condition d'en maîtriser l'efficacité. Une question essentielle qui est posée depuis de nombreuses années et qui fait l'objet d'oppositions correspond au choix du mode de récupération électrique ou thermique. Comme souvent dans ce type de débats la réponse est nuancée et dépend de multiples critères et notamment des types de besoin qu'il est nécessaire de combler. Ces besoins étant mixtes dans le cadre d'un bâtiment, on imagine facilement la nécessité de disposer des deux types de capteurs solaires photovoltaïque (PV) et thermique (ST), mais également l'intérêt de solutions hybrides (PV-T).

Dans ce contexte, ce travail a pour but d'évaluer les performances de ces différentes solutions en considérant des critères énergétiques, environnementaux et techniques. Ces technologies solaires sont intermittentes et nécessitent un couplage à des systèmes d'appoint tels des chaudières ou des pompes à chaleur. Elles nécessitent au même titre la présence d'un stockage thermique et/ou électrique, et une connexion du bâtiment à un réseau de chaleur, de gaz ou d'électricité. Il s'agit donc d'évaluer la performance de configurations de ces systèmes fonctionnant ensemble en utilisant des méthodes d'analyse multicritère pour répondre le plus efficacement aux besoins du bâtiment, pour différentes typologies et sous différentes météo et profils d'usage.

Une revue bibliographique d'articles traitant d'analyses multicritères a été conduite dans le but de recenser les différentes configurations étudiées pour répondre à des besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de climatisation et d'électricité du bâtiment. Cette revue a aussi pour but de recenser les critères qui sont pris en compte dans ce type d'analyse et leur méthode de quantification, qui peuvent être classés en quatre catégories distinctes : économiques, environnementales, énergétiques, techniques. Elle a ainsi permis de choisir les critères énergétiques, environnementaux et techniques pour ce travail, que sont les rendements énergétiques et exergétiques des systèmes dans leur fonctionnement. Pour les aspects environnementaux, il s'agira notamment des bilans carbone tout au long du cycle de vie des systèmes et l'épuisement des ressources.

*Intervenant

†Auteur correspondant: hafsa.fares@univ-smb.fr

Quant à l'aspect technique, il s'agira essentiellement de la complexité de l'installation et de maintenance. Ensuite, l'étude du rendement énergétique de différents systèmes solaires (PV, ST et PV-T) est évalué numériquement sous le logiciel TRNSYS en prenant en compte les mêmes conditions de fonctionnement, que sont les conditions météorologiques extérieures (température d'air ambiante et rayonnement) et les températures de modules, pour avoir une meilleure comparaison entre ces technologies en supposant les mêmes hypothèses.

Mots-Clés: Solaire, thermique, photovoltaïque, appoint, stockage, efficacité, multicritère

Pertes énergétiques dues à l'encrassement des systèmes PV en fonction de la zone géographique et du climat

Sébastien Arbaretaz * ^{1,2}, Christophe Menezo[†] ³, Emilie Planes[‡] ⁴

¹ Institut National de l'Énergie Solaire (INES) – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : DRT/LITEN/DTS, Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – Parc Technologique de Savoie Technolac 50 Av. du Lac Léman, Bâtiment Lynx - BP 332 F-73377 Le Bourget-du-Lac cedex, France

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

³ 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

⁴ LEPMI – Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS : UMR5279, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, LEPMI – France

L'encrassement réduit la quantité de lumière qui atteint les cellules solaires et conduit à une réduction de la production des systèmes photovoltaïques. Le type de matière qui se dépose peut varier en fonction de la situation géographique : sable, pollution, déjection d'oiseau, pollen ou émission agricole. L'accumulation de matière est influencée par un certain nombre de paramètres environnementaux tel que la température ambiante, l'humidité, le vent, la pluie ou les particules en suspension. Les paramètres du système tel que l'inclinaison, l'orientation ou la structure des modules ont également une influence sur l'accumulation de salissure. En raison de l'implantation de centrale photovoltaïque de grande taille dans des régions désertiques et du développement de système photovoltaïque flottant, les pertes énergétiques dues à l'encrassement à l'échelle mondiale sont amenées à augmenter ces prochaines années. Ainsi les enjeux autour de l'estimation de ces pertes, leur réduction et le nettoyage sont grandissant.

Dans cette étude, nous avons réalisé une revue littéraire sur l'impact de la salissure sur les systèmes photovoltaïques. Les valeurs du taux d'encrassement pour différente région du monde et différent type de salissure ont été regroupées et comparées entre elles. Ces mesures sont principalement pour des salissures minérales (sable, poussière) qui sont le type de salissure le plus étudié dans la littérature. Le taux d'encrassement est la variation quotidienne du coefficient d'encrassement qui est défini comme le rapport de la puissance ou de l'éclairement réel dans des conditions d'encrassement à la puissance ou l'éclairement prévu dans le cas où le groupe photovoltaïque est propre. Les pertes peuvent parfois être quantifiées avec le niveau d'encrassement qui correspond au coefficient d'encrassement soustrait à 1. Lorsque seule la masse de salissure par unité de surface est fournie pour un endroit, les pertes optiques sont estimées en utilisant l'équation de A. Hegazy qui est largement utilisé dans la littérature. Nous nous sommes égale-

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: christophe.menezo@univ-smb.fr

[‡]Auteur correspondant: emilie.planes@univ-smb.fr

ment intéressé dans notre comparaison aux particularités de la salissure (présence de composés hygroscopiques ou d'hydrocarbures) et de l'environnement des mesures (zone urbaine, zone agricole), ainsi qu'au climat en se référant à la classification de Köppen-Geiger.

Cette étude a pour objectif de fournir un aperçu des pertes dues à l'encrassement pour différentes régions du monde en prenant en compte les particularités de la salissure, de l'environnement proche des mesures et du climat. L'objectif est également d'identifier les régions et les climats qui sont le plus concernés par la salissure.

Mots-Clés: photovoltaïque, encrassement, salissure, état de l'art

Cube radiométrique pour estimation précise des rayonnements direct, diffus : calibration, modélisation et validation

Mahery-Henintsoa Andriamahefa * ¹, Vincent Bourdin ², Jordi Badosa ³,
Aurore Brézard Oudot ⁴, Anne Migan[†] ¹, Xavier Mininger ¹

¹ Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris (GeePs) – CentraleSupélec, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8507 – 11, rue Joliot CuriePlateau de Moulon91192 Gif sur Yvette, France

² Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique (LISN) – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus Universitaire bât 507Rue du Belvédère91405 Orsay cedexet Campus Universitaire bât 6401 rue Raimond Castaing91190 Gif-sur-Yvette, France

³ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) (LMD) – Institut National des Sciences de l’Univers, Ecole Polytechnique, Ecole des Ponts ParisTech, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8539, Département des Géosciences - ENS Paris – LMD ENS 24 Rue Lhomond 75231 Paris Cedex 05, France

⁴ Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris (GeePs) – CentraleSupélec, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8507 – 11, rue Joliot CuriePlateau de Moulon91192 Gif sur Yvette, France

L’objectif de notre étude est la réalisation d’un cube radiométrique constitué de quatre pyranomètres à photodiodes montés sur les faces est, sud, ouest et la face supérieure horizontale. Avec ces quatre mesures du rayonnement global, nous comptons pouvoir estimer en temps réel avec précision les rayonnements direct et diffus reçus dans n’importe quel plan incliné. Un tel système sera plus rapide et beaucoup moins chers que des pyranomètres à corps noir. La prise en compte de la non uniformité de la voûte céleste devrait être possible dans une certaine mesure ce qui n’est pas le cas pour les pyranomètres horizontaux.

La première étape consiste à modéliser ce système pour en valider la faisabilité et en prévoir les performances.

Nous avons choisi des pyranomètres à photodiode fabriqués par la société SOLEMS (modèle RG100). Ces quatre dispositifs ont été calibrés par comparaison avec un pyranomètre de référence (CMP22 de Kipp&Zonen), selon la norme ISO 9847 (1) (cf. Figure 1). Ceci afin de garantir la symétrie du dispositif. Les figures avant et après correction des constantes d’étalonnages des sondes sont présentées ci-dessous, sur les Figure 2 (a) et (b).

Pour terminer, les pyranomètres seront installés sur le cube radiométrique et une acquisition durant plusieurs mois permettra de réaliser une preuve de concept. Les résultats des estimations seront comparés aux mesures de rayonnements direct et diffus réalisés au SIRTa (2), observatoire du réseau BSRN où sera également installé ce cube.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: anne.dubois@centralesupelec.fr

Dans le poster, nous présenterons la modélisation, la calibration et la preuve de concept.

Ce cube est destiné à réaliser les mesures pour l'optimisation, en temps réel, des inclinaisons d'un plan de modules photovoltaïques (PV) et de réflecteurs plans pilotés par des vérins électriques. L'objectif est de maximiser à tout instant la collecte et l'absorption du rayonnement par les modules PV (rayonnement incident et réfléchi par les réflecteurs sur les modules) (3).

Mots-Clés: Rayonnement direct, Rayonnement diffus, Mesure, Modélisation

New comprehensive correlations for best tilt of East to West oriented solar surfaces in France and Italy

Fossa Marco ^{*† 1}, Memme Samuele ^{* 1}

¹ University of Genoa, Department of Mechanical, Energy, Management and Transport Engineering (DIME) (UNIGE) – Italie

The problem of the determination of yearly optimum tilt angle for solar applications is addressed in the present research with reference to a total of 216 locations in France and Italy: an original correlation is proposed to calculate the best surface tilt as the difference between the local latitude angle ϕ and a climate correction factor w calculated based on geographical and average weather data. To this aim, the values of direct and diffuse long-term radiation averages have been determined on the basis of 12-year available hourly global and diffuse irradiance data series derived from PV-GIS-SARAH tool and database according to an isotropic approach; by solving an optimization problem aimed at maximizing the yearly collectable energy by a sloped surface, the best tilt has been determined for each city for a set of orientation angles ranging from 0° (South-facing) to 90° (East or West facing): equations for the climate correction factor have then been considered from past literature works in terms of accuracy and a new one has been selected. A strategy to express its numerical coefficients as functions of the surface azimuth angle is provided, thus resulting in a reliable instrument for best tilt estimation of arbitrarily oriented surfaces. The accuracy of the proposed relation has been assessed by means of statistical analysis which highlighted a high correlation coefficient related to the "exact" angles found by optimization and the ones calculated by formula; statistical figures as the percentiles allowed then to assess that a large share of data are affected by negligible errors within the considered range of orientation angles.

Mots-Clés: tilt angle, azimuth, building integrated solar, clearness index

*Intervenant

†Auteur correspondant: marco.fossa@unige.it

CLÉ-DE-SOL : vers une meilleure maîtrise du flux solaire concentré et de la température au foyer de la centrale à tour Thémis et du four solaire de 1000 kW à Odeillo

Emmanuel Guillot *¹, William Baltus¹, Marina Casanova¹, Mohamed Haddach¹, Anita Haeussler¹, Laurent Lestrade¹, Jean-Louis Sans¹, Georges Pichelin¹, Antoine Perez¹, Magali Servel¹, Régis Rodriguez¹

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

Le projet CLÉ-DE-SOL (2021-2022, 1 M€) a pour objectif la maîtrise du flux solaire concentré et de la température au foyer de la centrale à tour Thémis et du four solaire de 1000 kW à Odeillo. Ces deux sites sont exploités par le laboratoire PROMES et font partie de l'infrastructure nationale FR-SOLARIS.

L'objectif principal est de développer des solutions originales permettant de délivrer un flux solaire concentré à la fois intense et de répartition spatiale et temporelle maîtrisée à la demande et de les tester sur les installations solaires de Thémis et du Grand Four d'Odeillo. Cela permettra de multiplier les possibilités de tests en conditions réelles et à échelle industrielle des récepteurs et procédés solaires à haute température et haut rendement, et d'améliorer la qualité de ces tests

Quatre actions sont engagées :

- Améliorer la précision de pointage des héliostats de Thémis.
- Créer une base de données des distributions de flux solaire délivrées par les héliostats individuels.
- Définir des stratégies de pointage des héliostats pour répondre à un objectif de carte de flux solaire concentré au foyer des installations selon les procédés à tester.
- Contrôler la distribution de température sur la face éclairée d'un récepteur solaire : imagerie par caméra infra-rouge.

Cette communication a pour objectif d'informer sur les actions menées et leur état actuel.

1) Améliorer la précision de pointage des héliostats de Thémis.

Le cœur du projet consiste à doter les 107 héliostats du champ solaire de Thémis exploité par

*Intervenant

le CNRS d'un dispositif de pilotage offrant une très grande souplesse d'exploitation et une très grande fiabilité. Le projet CLE-DE-SOL est consacré à la conception, au développement et à la mise en œuvre d'un nouveau système embarqué pour le pilotage des héliostats, à l'installation d'une transmission précise et fiable par fibre optique, d'une nouvelle distribution électrique activable à la demande, de nouvelles batteries de puissance. Les logiciels de pilotage des héliostats sont modifiés pour exploiter au mieux cette nouvelle architecture.

2 & 3) Créer une base de données des flux solaires concentrés et définir des stratégies de tir des héliostats

Un ensemble de logiciel a été conçu et mis au point pour constituer cette base de données à partir de données expérimentales pour le système optique à double réflexion qu'est le Grand Four d'Odeillo. Un algorithme génétique a ensuite été développé et validé par fluxmétrie pour définir des stratégies de tir pour un dispositif expérimental test.

En parallèle, des travaux similaires ont été commencés sur le site de Thémis, système optique à une seule réflexion : des mesures expérimentales ont été faites, et les méthodes de constitution de la base de données sont en évaluation. En terme de stratégie de tir, une méthode de descente de gradients développée sur le projet NextCSP à partir de données de lancer de rayon servira de base de travail.

4) Mesures thermographiques aux foyers d'installations solaires

Une caméra MWIR a été sélectionnée et est cours d'approvisionnement : les objectifs de mesure, contraintes, et choix techniques seront présentés.

Mots-Clés: four solaire, tour, heliostat, caméra, contrôle commande, algorithme, IA, génétique, fluxmétrie, lancers de rayon

Predictive models for the diagnostics and monitoring of large PV plants from electric parameter measurements and aerial thermal imaging

Parenti Mattia * ¹, Fossa Marco * † ¹, Roncan Riccardo ²,
Delucchi Lorenzo ¹

¹ University of Genoa, Department of Mechanical, Energy, Management and Transport Engineering
(DIME) (UNIGE) – Italie
² Erg S.p.A. – Italie

The topic of this work is the development of useful models for the automatic monitoring of the performance of large photovoltaic systems. This issue is increasingly important due to the rise in the spread of photovoltaic systems and allows to identify and / or predict failures and malfunctions, in order to promptly assess the convenience of any maintenance and replacement of plant components. The use of models that simulate the performance of strings of the inverter and strings of photovoltaic modules has made it possible to develop an effective method for the identification of plant and inverter downtime and to estimate the loss of electricity production as a result of downtime. In addition, comparing the performance of individual strings allowed the identification of malfunctions and failures. These diagnostics and monitoring systems have been tested on six twin plants located in Puglia (Italy), owned by ERG S.p.a. In addition, the analysis of the thermographs permitted to identify the thermal anomalies that most penalize the performance of the photovoltaic modules.

Mots-Clés: PV plant, failure prediction, PV modeling, PV diagnostics, thermographic analysis

*Intervenant

†Auteur correspondant: marco.fossa@unige.it

Développement sous TRNSYS d'un outil de prédiction d'une centrale solaire photovoltaïque en milieu rigoureux

Daha Hassan Daher ¹, Léon Gaillard ², Christophe Menezo ³,

¹ Centre d'Etudes et de Recherche de Djibouti, Laboratoire des Energies Nouvelles et Renouvelables, Djibouti

² Helicity SAS, 31 rue Gustave Eiffel, 38000 Grenoble, France

³ LOCIE UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, Solar Academy Graduate School, INES, F-73376, Le Bourget-du-Lac, France

Avec l'augmentation des applications photovoltaïques (PV) à travers le monde et notamment les zones à fort ensoleillement "Sunbelt", il est vital de développer des outils fiables pour calculer le potentiel de production énergétique. Une prédiction précise des paramètres caractéristiques, des modules, des chaînes et des rangées de capteurs solaires PV est essentiel autant pour estimer au mieux les performances du système à la fois lors des phases de planification et de conception d'installations photovoltaïques que pour après la mise en service afin d'identifier d'éventuels dysfonctionnements. Cependant, les spécifications techniques des fabricants des modules PV sont précisées pour les conditions de test standard (STC): rayonnement incident de 1000 W/m², une température des cellules de 25°C et un spectre de référence AM1,5 ; trop loin des conditions réelles de fonctionnement pour les climats chauds et ensoleillés pour permettre une simple extrapolation par coefficients linéaires. Un modèle de prédiction de l'énergie solaire photovoltaïque générée précis et fiable est donc nécessaire pour évaluer les performances en conditions réelles. Cette étude présente un modèle dynamique d'une installation photovoltaïque de 302,4 kWc située au Centre d'Etudes et de Recherche de Djibouti. La modélisation des rangées PV a été réalisée dans TRNSYS et a été validée en utilisant une séquence contrôlée des données d'un champ PV entièrement monitoré. Pour une prédiction des performances des systèmes photovoltaïques pour ce milieu rigoureux, plusieurs facteurs ont été prises en compte, telles que la réduction de la puissance au cours du temps, l'empoussièrement, le choix de la base de données météorologique en ce qui concerne les modèles pour le calcul du rayonnement sur une surface inclinée et de la température des modules. Ces aspects ont été analysés en détail en s'appuyant sur une analyse des mesures in-situ, pour l'élaboration du modèle prédictif. Ce dernier a été ensuite analysé à travers une étude paramétrique pour mettre en évidence l'influence des paramètres (empoussièrement, du taux de nettoyage, de la fréquence de nettoyage et la pluie) sur les performances prédites.

Mots-Clés: centrale solaire PV, modélisation, TRNSYS, prédiction, analyse paramétrique

Photo-procédés

Ingénierie de la production d'hydrogène solaire par photosynthèse artificielle

Jeremi Dauchet ^{*† 1}, Jean-François Cornet ¹, Guillaume Foin ¹, Frederic Gloaguen ², Fabrice Gros ¹, Thomas Vourc'h ¹, Daniel Yaacoub ¹

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France – CNRS : UMR6602 – France

² Université de Bretagne Occidentale, CNRS, Laboratoire CEMCA, F-29200 Brest, France – CNRS : UMR6521 – France

Cette présentation traite de la production photo-réactive directe d'hydrogène à partir d'eau et d'énergie solaire, connue également sous le nom de photosynthèse artificielle. Sont abordés à la fois la recherche de photocatalyseurs pour activer efficacement la décomposition de l'eau, la principale source d'hydrogène sur Terre, et les développements nécessaires en sciences de l'ingénieur pour valider les deux technologies envisageables pour la production d'hydrogène solaire, à savoir les photo-réacteurs et les cellules photo-électrochimiques. Les paramètres clé pour la conception et l'optimisation de ces technologies ainsi que les performances maximales qu'il sera possible d'atteindre sont présentés et discutés sur la base de l'analyse de modèles de connaissances unifiés. Ces performances maximales nécessiteront le développement de technologies innovantes basées sur la dilution du rayonnement solaire et l'hybridation pour valoriser la partie infrarouge non photo-réactive du spectre. Nous montrerons aussi comment la conception optimale de ces procédés bénéficie d'avancées récentes pour la formulation en processus des modèles multi-échelles couplés, qui permet par rebond une résolution numérique aisée en géométrie complexe par la méthode de Monte Carlo. Les démonstrateurs qui en résultent pourront être testés sur la nouvelle plateforme PAVIN Solaire (Clermont-Ferrand) dédiée à l'étude des carburants solaires jusqu'à TRL 5.

Mots-Clés: Hydrogène renouvelable, carburant solaire, photoréacteur, cellules photo, électrochimiques.

*Intervenant

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

Propriétés radiatives de photocatalyseurs Charbon-Actif/TiO₂ en suspension : Effets de la composition sur le transfert radiatif en photoréacteur.

Enrique Ribeiro * ¹, Vincent Goetz ¹, Gael Plantard ¹

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

Les photoréacteurs se présentent comme une technologie d'avenir pour des applications de photo-conversion telles que le traitement de l'eau ou la production d'hydrogène. Parmi les procédés permettant la photo-conversion, la photocatalyse est attrayante de par sa durabilité énergétique et environnementale. En effet, cette dernière a fait ses preuves par son efficacité, sa non-selectivité, l'utilisation de catalyseurs par définition non-consommés lors de la réaction, et enfin la possibilité d'utiliser l'énergie solaire comme source de fonctionnement. Un challenge limitant sa dissémination à grande échelle réside dans la gestion des intermittences qui caractérisent la ressource solaire, à l'échelle de la journée et des saisons (passages nuageux, cycles jour/nuit, cycles saisonniers). Une solution développée dans la littérature ces dernières années consiste en la synthèse de matériaux à la fois efficace du point de vue de la photo-oxydation mais aussi capable de stocker les molécules cibles de la photo-conversion lors des phases de faible ensoleillement. La voie privilégiée au sein de nos travaux antérieurs a été l'association du photocatalyseur TiO₂ avec un matériau adsorbant à haute surface spécifique, le charbon actif (CA). Les résultats de ces travaux ont montré la possibilité de créer des composites CA/TiO₂ sous forme pulvérulente par mécanosynthèse (1), une voie originale permettant de moduler facilement la composition des entités créées. Les premiers essais d'utilisation de ces matériaux en photoréacteur continu pour une application de traitement de l'eau ont par ailleurs apporté des résultats prometteurs concernant la gestion d'intermittences de la ressource solaire (2).

L'optimisation de l'utilisation des composites CA/TiO₂ en photoréacteur passe nécessairement par le contrôle des paramètres inhérents au système en tout point du milieu : concentration des molécules cibles de photo-conversion, concentration en catalyseurs, quantité de photons disponibles. La concentration des espèces et catalyseurs étant bien maîtrisée, il est maintenant nécessaire d'être capable de décrire la quantité de photons disponible localement et utilisée, en accédant notamment à la vitesse volumétrique locale d'absorption de l'énergie radiante (VVLAER).

Les travaux actuels consistent donc à rendre possible cette description en résolvant l'équation des transferts radiatifs (ETR) au sein d'un photoréacteur constitué d'une suspension de composites CA/TiO₂ de différentes compositions. La difficulté réside dans la complexité des suspensions dont il est d'abord nécessaire d'étudier un certain nombre de caractéristiques (granulométrie,

*Intervenant

indices de réfraction des constituants, porosité, ...). Dans un second temps, les propriétés radiatives des composites sont calculées au moyen de la théorie de Mie. Enfin, l'ensemble de ces propriétés sont intégrées dans un algorithme de MonteCarlo permettant la résolution de l'ETR et l'obtention des profils de VVLAER dans le photoréacteur étudié. L'originalité de ce travail repose sur une variation en composition des composites fabriqués, permettant de rendre compte de l'influence de ce facteur sur le transfert radiatif qui en résulte dans le photoréacteur.

(1) Ribeiro E., Plantard G., Goetz V., 2021 , "TiO₂ grafted Activated Carbon elaboration by milling: composition effect on sorption and photocatalytic properties", J.Photochem.&Photobiol.A:Chem. 408, 113108.

(2) Dezani, 2020, "Photocatalyse hétérogène en réacteurs ouverts pour la gestion de la ressource solaire : expérimentations sur différents médias et modélisation", ThèseUniv.Perpignan.

Mots-Clés: Transfert radiatif, Photocatalyseur, Photoréacteur, Applications solaires.

Etude d'une réaction de photooxygénation avec sensibilisateur soluble et supporté dans des photoréacteurs continus microstructurés éclairés par des LEDS visibles

Robbie Radjagobalou ¹, Jean-François Blanco ², Karine Loubière ^{*† 3}

¹ Laboratoire de Génie Chimique (LGC) – CNRS : UMR5503, Université de Toulouse, INPT, UPS – 4 allée Emile Monso CS 84234 31 432 Toulouse cedex 4, France

² Laboratoire de Génie Chimique (LGC) – CNRS : UMR5503, Université de Toulouse, INPT, UPS – 4 allée Emile Monso CS 84234 31 432 Toulouse cedex 4, France

³ Laboratoire de Génie Chimique (LGC) – CNRS : UMR5503, Université de Toulouse, INPT, UPS – 4 allée Emile Monso CS 84234 31 432 Toulouse cedex 4, France

La photochimie préparative est une voie de synthèse incontournable dans le contexte de la chimie verte, en donnant accès à des molécules de haut degré de complexité moléculaire, souvent en une étape et sans ajout de réactifs supplémentaires. Le photon peut être également considéré comme un réactif "sans trace". L'énergie solaire offre une alternative durable pour les synthèses photochimiques, en lieu et place des sources de lumière artificielles (Oelgemoller, 2016, *Chem. Rev.* 116, 17).

Les réactions de photooxygénation sont particulièrement intéressantes pour synthétiser des dioxétanes-1,2, des hydroperoxydes ou des endoperoxydes. L'oxygène singulet (1O_2) y est généré par photosensibilisation de l'oxygène moléculaire (triplet), le plus souvent dans le domaine du visible et en présence de faibles quantités d'un sensibilisateur organique (colorant). Au niveau industriel, les exemples emblématiques ont trait à des applications à faible tonnage et à haute valeur ajoutée, dans les industries du parfum, des arômes ou pharmaceutiques (e.g. oxyde de rose, artémisinine). Cette transposition industrielle se heurte néanmoins à des verrous technologiques et scientifiques, liés en partie à l'utilisation de réacteurs batch éclairés par des lampes à mercure (polychromatiques, énergivores), et de solvants chlorés (durée de vie de l'oxygène singulet).

Dans ce contexte, nos travaux s'intéressent à la réaction de photooxygénation de l' α -terpinène en ascaridole, dans un solvant vert (éthanol) et avec un sensibilisateur d'intérêt industriel (rose de Bengale). Des expérimentations ont été réalisées dans trois réacteurs continus microstructurés éclairés par des LEDs visibles. Un modèle de représentation 1D a été développé prenant en compte (i) le flux de photons incident mesuré par actinométrie (sel de Reinecke), (ii) la loi cinétique établie à partir de considérations mécanistiques, (iii) le degré de collimation du champ de radiation émis par les LEDs, et (iv) la réflexion de la lumière à la surface optique arrière du photoréacteur. Ce modèle, qui a vocation à être affiné, s'avère être un outil de choix pour formaliser le couplage non-linéaire entre phénomènes impliqués, mais aussi pour analyser et estimer les cinétiques aux différentes échelles de productivité. Enfin, des colloïdes photoactifs,

*Intervenant

†Auteur correspondant: karine.loubiere@cnrs.fr

synthétisés par copolymérisation par mini-émulsion (Petrezza et al, 2019, *Polym. Chem.* 10, 3170–3179) ont été mis en œuvre en tant que photosensibilisateurs supportés, dans une stratégie de réduction des opérations de séparation (recyclage).

Ces travaux ont été financés par le projet ANR-15-CE07-0008-01 PICPOSS.

Mots-Clés: Photochimie solaire. Photooxygénation. Colloïdes photoactifs.

Production de carburants solaires par photosynthèse artificielle en photoréacteur : Application à l'hydrogène

Guillaume Foin * ¹, Jean-François Cornet[†] ¹, Fabrice Gros[‡] ¹, Jeremi
Dauchet[§] ¹, Thomas Vourc'h[¶] ¹

¹ Institut Pascal, axe GePEB (IP) – CNRS : UMR6602 – INSTITUT PASCAL Campus Universitaire
des Cézéaux 4 Avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière, France

Dans le contexte actuel de décarbonation des sociétés humaines, l'hydrogène vert peut être amené à jouer un rôle central en tant que vecteur énergétique. La photosynthèse artificielle est un procédé permettant de produire de l'hydrogène à partir d'eau, à l'aide d'un photo-catalyseur sous l'action de la lumière. En laboratoire, on utilise un photoréacteur d'étude fermé au sein duquel les particules de photo-catalyseur sont en suspension en phase aqueuse. La densité de flux de photons incidente est contrôlée par un panneau de LED quasi-collimaté normal. La température est contrôlée par un bain thermostatique. Un capteur de pression permet de déterminer la vitesse de production d'hydrogène.

Les photocatalyseurs " modèle " utilisés dans cette étude sont des particules de sulfure de cadmium CdS dont les performances peuvent être améliorées par une déposition en surface du disulfure de molybdène MoS₂ en tant que co-catalyseur de réduction des protons. Les prédictions de la vitesse de production d'hydrogène et de l'efficacité thermodynamique du procédé passent par le développement de modèle de connaissance multi-échelle, s'appuyant notamment sur différents corpus de la physique. Les domaines de l'optique, de l'électromagnétisme puis du transfert radiatif sont couplés à une loi thermocinétique, établie à l'échelle du grain de photo-catalyseur. La loi de couplage thermocinétique établit une relation non-linéaire entre la vitesse de production d'hydrogène et la vitesse d'absorption des photons, la première évoluant proportionnellement à la racine carrée de la seconde. La formulation intégrale de ces modèles et leur résolution en géométrie complexe par la méthode de Monte Carlo occupe une place importante, car elles sont parfaitement adaptées à l'optimisation des futurs procédés à l'échelle industrielle.

La loi de couplage thermocinétique fait apparaître un paramètre agrégé unique, qui est actuellement identifié sur les résultats expérimentaux. L'objectif du présent travail est de mieux décrire cette loi de couplage (réification du modèle de connaissance) en l'exprimant en fonction de paramètres mesurables et clairement identifiés, tels que la température, la taille des particules, le pH, la concentration en donneurs sacrificiels lorsqu'ils sont nécessaires et la teneur en co-catalyseur. Les expériences actuellement réalisées en laboratoire visent à valider une nouvelle formulation du couplage, prenant en compte la taille des particules. L'influence de la température est modélisée grâce à la théorie de Marcus-Gerischer, permettant de décrire la vitesse du

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: Jean-Francois.Cornet@sigma-clermont.fr

[‡]Auteur correspondant: fabrice.gros@sigma-clermont.fr

[§]Auteur correspondant: Jeremi.dauchet@sigma-clermont.fr

[¶]Auteur correspondant: thomas.vourc-h@sigma-clermont.fr

transfert d'électrons à l'interface semi-conducteur|électrolyte lors des réactions de réduction et d'oxydation.

Mots-Clés: hydrogène solaire, photosynthèse artificielle, photoréacteur, photocatalyseur, couplage thermocinétique

Concentration et solaire thermodynamique

Modélisation d'un collecteur solaire à absorption volumique utilisant des nanoparticules de carbone dispersées dans l'eau.

Miguel Sainz Manas * ¹, Cyril Caliot ¹, Françoise Bataille ¹, Alexis Vossier ¹, Gilles Flamant[†] ¹

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

Des études récentes ont montré les propriétés d'absorption élevées dans le spectre visible des nanofluides (fluide contenant des nanoparticules dispersées). Ils présentent donc un grand potentiel de développement pour les collecteurs solaires à absorption directe (DASC). Les DASCs sont des absorbeurs volumiques constitués d'un fluide absorbant chauffé à travers une paroi transparente. Les nanoparticules à base de carbone sont des bons candidats pour réaliser des nanofluides en raison de leurs propriétés optiques et thermiques. Dans cette étude, nous présentons les résultats d'un modèle de récepteur à absorption directe (DAPTC) pour collecteur cylindro-parabolique utilisant des nanoparticules de carbone dispersées dans l'eau.

Les propriétés optiques spectrales ont été obtenues avec un spectrophotomètre Perkin-Elmer® (0,25-2,5 μm) avec quatre échantillons du nanofluide à faible concentration (0,0025-0,01 g/l). La transmittance du fluide dans le spectre visible décroît exponentiellement avec la concentration des particules. La réflectance ne varie pas avec la concentration en carbone et reste très faible ($\sim 5\%$) dans tout le spectre, ce qui permet de négliger la diffusion. En appliquant la loi de Beer-Lambert au spectre solaire (AM1.5) dans le milieu considéré, le coefficient d'extinction moyen dans le spectre visible a été calculé pour tous les échantillons. Une évolution linéaire du coefficient d'extinction est observée en fonction de la concentration des particules, permettant ainsi de prédire l'absorption pour des concentrations et chemins optiques plus élevés. Des absorptions de 80% et 95% sont obtenues avec des concentrations de 0,01 et 0,02 g/l respectivement pour un chemin optique de 50mm.

Le DAPTC a été étudié avec Ansys-Fluent® en utilisant le coefficient d'absorption déterminé expérimentalement pour quantifier le terme source radiatif dans l'équation de conservation de l'énergie. Le volume du fluide absorbeur a été modélisé uniquement pour un cylindre de 2,5 m de long et 50 mm de diamètre avec un rayonnement incident de 20 kW/m² concentré sur l'axe selon un angle de 120°. Les pertes par convection et par émission de l'enveloppe cylindrique ont été négligées dans cette approche du fait de la présence d'une couche sous-vide entourant le tube et les basses températures de fonctionnement. A l'entrée, une température du fluide de 20 °C et une vitesse de 0,01 m/s ont été choisies pour simuler un régime d'écoulement laminaire. La

*Intervenant

†Auteur correspondant: Gilles.Flamant@promes.cnrs.fr

faible teneur en carbone des nanofluides permet de négliger la présence de carbone et d'assimiler les propriétés thermo-physiques du fluide étudié à celles de l'eau (ces dernières étant fonction de la température).

En définissant directement le terme source radiatif dans l'équation de conservation, les simulations montrent des résultats plus précis en comparaison avec la méthode des ordonnées discrètes qui présente un effet de rayon prononcé pour ce cas d'étude (rayonnement concentré). Une concentration en nanoparticules de 0,01 g/l conduit à une absorption plus homogène dans le fluide comparativement à la solution de 0,02 g/l, ce qui résulte en une distribution de température plus homogène sans considérer la convection naturelle. Cependant, la valeur du nombre de Grashof montre la nécessité de considérer la convection naturelle dans les simulations. Ces résultats seront présentés dans la communication finale.

Mots-Clés: Energie solaire concentrée, Collecteur solaire à absorption directe, Nanofluide, Carbone.

Co-optimisation de la stratégie de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration et d'une centrale solaire plan hybridées avec une chaudière biomasse pour la production de chaleur industrielle à deux niveaux de température

Simon Kamerling * ^{1,2}

¹ Université Savoie Mont Blanc – Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) - Grenoble – France

² Commissariat à l'énergie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) – Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) - Grenoble – 50 Av. du Lac Léman, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

La chaleur pour l'industrie représente 25% de la consommation finale d'énergie au niveau mondial, et environ 8 Gt de CO₂ par an, i.e. 25% des émissions mondiales. Les énergies renouvelables représentent moins de 10% de la production totale de chaleur pour l'industrie, et le solaire thermique moins de 1%. Cette thèse a pour objet l'optimisation au niveau système de la stratégie de contrôle des centrales solaires hybrides pour la production de chaleur industrielle. Au cours de travaux précédents (Kamerling et al., 2021), l'accent a été mis sur l'optimisation de la stratégie de contrôle d'une unique centrale solaire, au moyen d'algorithmes MILP (Mixed Integer Linear Programming). L'intérêt d'une optimisation du niveau de température dans un champ solaire a été démontré. En tirant parti du fait que la chaudière soit en série avec l'installation, il est possible de baisser la température de sortie du champ solaire, donnant alors un gain en fraction solaire pouvant atteindre 2% en variation absolue.

Un autre degré de liberté existe au niveau de l'intégration de la centrale solaire thermique au procédé. En effet, un industriel peut avoir besoin de chaleur à différents niveaux de température. Cette multiplicité des besoins est encore plus courante si on se situe au niveau de parcs ou d'écoparcs industriels.

Le système considéré dans cette étude est constitué d'une centrale "duale" fonctionnant à deux niveaux de température, avec deux ballons de stockage de type thermocline. Une chaudière biomasse est placée en série en sortie des systèmes de stockage, afin de permettre la production continue de chaleur. Dans ces travaux, nous souhaitons maintenant explorer la possibilité que la partie de la centrale solaire à concentration puisse participer à la demande aux deux niveaux de température: lors d'une baisse de l'ensoleillement, le système à concentration pourrait alors augmenter les calories récupérées en travaillant pour le processus à plus basse température.

*Intervenant

L'approche algorithmique est constituée de trois phases : une phase de précalcul de la production solaire en fonction des niveaux de température, dont les résultats sont injectés dans un algorithme d'optimisation MILP. Cet algorithme MILP donne en résultat une trajectoire de contrôle pour le débit circulant dans les champs solaires. Ensuite, cette trajectoire de contrôle fournie par le MILP est appliquée à un modèle non linéaire détaillé, chargé d'évaluer les performances réelles de la réponse du système à cette trajectoire. Une comparaison est faite avec une trajectoire de contrôle où les deux centrales ne travaillent que pour leur température de sortie de design respective. Le solveur utilisé est CPLEX, via l'interface Osi - OpenSolverInterface proposé par Coin-Or. L'ensemble des modèles a été codé en C++. Notons que le code présente une grande versatilité permettant de coder des systèmes plus complexe, avec de plus nombreux procédés et technologies et permettant une intégration simple. Pour l'instant, on peut y trouver de nombreux types de chaudières et technologies solaires, et une éolienne thermique. L'approche sera expliquée mais un cas d'étude simple sera présenté; une demande journalière variable sera considérée, à deux niveaux de température: 80°C et 160°C respectivement.

Mots-Clés: SHIP, chaleur, industrie, processus, concentration, solaire, hybride

Optimisation de centrales solaires à concentration: calcul de sensibilité par Monte Carlo et couplage avec un algorithme à descente de gradient

Zili He * ¹, Simon Eibner ¹, Mouna El Hafi ¹, Jean-Jacques Bezian ¹, Paule Lapeyre ²

¹ Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés, des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement (RAPSODEE) – IMT Mines Albi – Campus Jarlard - Route de Teillet 81013 ALBI Cedex 09, France

² University of Waterloo – Canada

Optical optimizations for a csp system are very limited to gradient-free methods, since the gradient is hard to obtain by using the existing numerical optic tools in the community. This work aims to build new algorithms of Monte-Carlo type, for a solar tower power system, based on the physics of radiation, numerically estimating the gradient of power impacting the receiver, with respect to the geometric parameters who characterize the geometric status of heliostats in the heliostats filed.

Physical models will be built for the specific intensity and also for its derivatives to geometric parameters of heliostats, also called geometric sensitivities of intensity.

Similar to the intensity but with their own models, they are regarded as physical quantities emitted, absorbed and reflected in the system.

They carry the perturbations of intensity as informations, corresponding to the relations between the geometric parameters and the physical events in solar tower power system: blocking, spillage, shadowing, etc.

These relations will be distinguished and discussed.

Finally, not only the gradient but also the contributions of physical events (blocking, spillage, shadowing, etc) to the gradient can be estimated for further sensitivity analyses and optimization process.

Mots-Clés: Monte, Carlo, Optimization, Gradient, Solaire à concentration

*Intervenant

Influence de l'orientation d'un réseau de concentrateurs linéaires Fresnel sur leurs performances optiques : le cas de la centrale solaire eLLO

Edouard Montanet * ¹, Sylvain Rodat[†] ¹, Quentin Falcoz ¹

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

La centrale solaire de Llo, exploitée par SUNCNIM, est basée sur une technologie modulaire de concentrateurs linéaires Fresnel (LFC). L'installation solaire se situe sur le plateau cerdan, une région montagneuse des Pyrénées-Orientales, au sein d'une zone naturelle d'intérêt écologique. Les travaux de terrassement étant interdits, l'exploitant a dû adapter la configuration du champ solaire en fonction des contraintes liées à la topographie. Ainsi, l'orientation des lignes solaires diffère de l'orientation Nord/Sud (NS) de la quasi-totalité des centrales LFC en cours d'exploitation et se trouve décalée de l'axe NS de 50,9° du Nord vers l'Ouest.

Dans ce contexte, l'impact de l'orientation des modules LFC sur les performances optiques est évaluée grâce à une méthode probabiliste de lancer de rayons (méthode de Monte-Carlo). Les pertes optiques sont évaluées pour toutes les positions solaires et sont exprimées sous la forme de coefficients d'atténuations, appelés Incidence Angle Modifier (IAM) en anglais. Enfin, le rendement optique de chaque module solaire est déterminé en identifiant la position solaire dans le repère du module et les IAM correspondant.

L'influence de l'orientation est évaluée en comparant les performances optiques annuelles d'une ligne solaire orientée comme la centrale à des lignes orientées NS et Est/Ouest (EO). L'efficacité des lignes est exprimée par un rendement optique annuel ($\eta_{\text{opt-annuel}}$) correspondant au rapport entre l'énergie solaire absorbée par le tube absorbeur et l'énergie solaire incidente évaluée à l'aide d'un modèle de calcul d'irradiance par temps clair (1). Le $\eta_{\text{opt-annuel}}$ de la ligne orienté NS est égale à 39,4% contre 38,5% pour l'orientation EO et 39,2% pour la ligne orientée comme la centrale solaire de Llo. Ces performances optiques montrent que, pour la latitude de la centrale, une implémentation NS serait légèrement plus intéressante qu'une implémentation EO.

Une analyse identique est réalisée pour une latitude plus faible (Aswan, Egypte) afin de revenir aux conclusions de Abbas et al. (2) qui montrent que l'implémentation EO est plus intéressante pour des latitudes éloignées de l'équateur, tandis qu'une implémentation NS est à favoriser pour des projets proches des tropiques. Pour cette nouvelle localisation, le $\eta_{\text{opt-annuel}}$ vaut 47,8% pour une implémentation NS et 41,1% pour l'implémentation EO soit un écart relatif de 6,7%. Ainsi, la latitude de la centrale solaire de Llo est proche de la latitude limite à laquelle une

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: sylvain.rodatt@promes.cnrs.fr

implémentation EO sera plus efficace qu'une implémentation NS. Pour conclure, la SUNCNIM, en s'adaptant à la topographie, a défini une orientation qui ne dégrade pas les performances optiques des champs solaires. Seulement, la topographie du terrain a aussi imposé à l'exploitant d'incliner les modules de la centrale ce qui, comme l'impact de l'orientation, pourra être évaluée en utilisant une méthode similaire.

(1) R. E. Bird and R. L. Hulstrom, "A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces," *Sol. Energy Res. Inst.*, 1981.

(2) R. Abbas, M. Valdés, M. J. Montes, and J. M. Martínez-Val, "Design of an innovative linear Fresnel collector by means of optical performance optimization: A comparison with parabolic trough collectors for different latitudes," *Sol. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.05.047.

Mots-Clés: Concentrateur linéaire Fresnel, Optique

Stockage et gestion de l'intermittence

Configuration optimization of multi-layered thermocline storage system for greenhouse by phase change material fillers

Baoshan Xie ^{*† 1}, Nicolas Baudin ^{* 1}, Jérôme Soto ¹, Yilin Fan ¹, Lingai Luo ¹

¹ Laboratoire de Thermique et d'Énergie de Nantes (LTeN) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6607, Nantes Université - Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes – Laboratoire de Thermique et Énergie de Nantes (LTeN) - UMR6607 Polytech Nantes bat. ISITeMLa Chantrerie, rue Christian Pauc - CS 5060944306 Nantes cedex 3, France

The greenhouse heating might be provided by solar or cogenerating systems. In this situation, a heat storage is required to manage the mismatch between the heating needs of the greenhouse and the heat harvested from solar or cogenerated sources. Packed-bed thermocline system is a potential technique that could be used for heat storage. The design of such system is investigated here taking into account the heating source fluctuations due to weather uncertainties. Then, the optimization of different fillers configurations in thermal cycling process using numerical and experimental methods are studied to improve the stability and efficiency of system. We validated the model using the experimental data of the lab-designed multi-layered packed-bed TES tank filling both phase change material (PCM) and sensible fillers. This study shows the stabilization effect of a filler with PCM located at the inlet or the outlet. At last, in order to fully use the tank storage capacity within the limited radiation time, the optimization of multi-layered packing strategies of tank through different layer thicknesses and different phase change temperatures packing is under progress.

Mots-Clés: Thermal energy storage, phase change material, optimization, multi, layered configuration, greenhouse

*Intervenant

†Auteur correspondant: baoshan.xie@univ-nantes.fr

Systèmes de stockage d'énergie par CO2 comprimé : état de l'art et perspectives

Florent Dewevre * ^{1,2}, Clément Lacroix ¹, Khaled Loubar ¹, Sébastien Poncelet ²

¹ GEPEA-CNRS UMR 6144, IMT Atlantique, France – IMT atlantique – France

² Université de Sherbrooke [Sherbrooke] – Canada

Dans le but d'augmenter la part de production d'électricité par des énergies renouvelables, pour les communautés reliées ou non au réseau électrique, des systèmes de stockage sont nécessaires pour pallier aux intermittences. Parmi les moyens de stockage mécaniques, les procédés de stockage d'énergie par air comprimé (CAES) suscitent de plus en plus d'intérêt. Ils sont aujourd'hui caractérisés comme des systèmes de stockage à grande échelle, ayant une durée de vie supérieure et économiquement avantageux puisqu'utilisant des technologies matures et peu consommatrices de ressources. Les procédés de stockage d'énergie par dioxyde de carbone comprimé (CCES) sont basés sur la même technologie et fonctionnent avec le CO2 comme fluide de travail. Ils permettent une valorisation du captage de dioxyde de carbone et ce fluide possède l'avantage d'une température critique proche de la température ambiante permettant un stockage liquide dans des conditions de températures non extrêmes. Dans le but de rassembler les derniers travaux et de réaliser une étude numérique et expérimentale sur un procédé CCES, une étude bibliographique a été menée. Trente-cinq études théoriques et expérimentales ont été répertoriées. La majorité d'entre elles sont des études thermodynamiques (analyse énergétiques et exergétiques) en état stationnaire avec une analyse de sensibilité. La différence entre les systèmes réside par la présence ou non de source de chaleur externe, par l'état thermodynamique du CO2 stocké, ainsi que le moyen de récupération et d'utilisation de la chaleur. Ces systèmes ont été comparés d'un point de vue technique (efficacité énergétique, efficacité exergétique et densité énergétique) suivant leurs caractéristiques (source de chaleur externe ou non et état de stockage du fluide). La question de leur compétitivité d'un point de vue économique avec les batteries se pose pour des échelles intermédiaires de stockage. Une analyse environnementale est donc intéressant à prendre en compte.

Mots-Clés: Stockage, dioxyde de carbone, CCES

*Intervenant

Procédé thermo-chimique hybride : problématique du couplage entre réacteur thermo-chimique et expandeur, pour la conversion en froid et électricité de source basse température

Hasan Ghazale * ¹, Guillaume Morel * ¹, Harley Pages ¹, Emmanuel Hernandez ^{1,2}, Jean-Jacques Huc ^{1,2}, Alexis Godefroy ^{1,2}, Nathalie Mazet ¹,
Maxime Perier-Muzet * † ^{2,1}

¹ Procédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) – Université de Perpignan Via Domitia, 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 Perpignan Via Domitia (UPVD) – Université de Perpignan Via Domitia – 52 avenue Paul Alduy - 66860 Perpignan Cedex 9, France

Les procédés thermo-chimiques hybrides sont des cycles thermodynamique innovants par leur multifonctionnalité (stockage, production de froid et d'électricité) et par leur capacité à valoriser des sources thermiques basse température telles que solaire ou chaleurs fatales. Le concept d'hybridation des cycles thermo-chimiques consiste à valoriser non seulement les effets endo ou exothermiques liés à la réaction chimique gaz/solide en jeu, mais aussi le flux de gaz réactif résultant de cette réaction. Pour cela, un organe de détente (expandeur) est inséré sur ce flux de gaz. Le procédé opère alors de façon non-isobare, contrairement au fonctionnement classique des procédés à sorption, et cet expandeur permet une production d'énergie mécanique, en plus des productions thermiques des procédés à sorption classiques.

Les problématiques scientifiques portent essentiellement sur le couplage entre les composants du procédé, l'adéquation de leurs conditions de fonctionnement et de leurs dynamiques. Un couplage-clé est celui entre le réacteur et l'expandeur, qui est caractérisé par un effet antagoniste de la pression de couplage sur le comportement de ces 2 composants. Cette pression peut favoriser la cinétique du réacteur et donc la puissance thermique en jeu, et défavoriser le rapport de pression aux bornes de l'expandeur et donc la puissance mécanique produite.

Pour analyser ce fonctionnement, un modèle dynamique 0D de l'ensemble du procédé a été développé. Il a permis d'analyser le couplage réacteur/expandeur et de mettre en évidence l'existence d'un maximum de puissance mécanique produite selon la pression.

Un prototype, preuve de concept, est de plus en cours d'expérimentation. Il met en jeu un réacteur à lit fixe, type tube-calandre (7 tubes, chacun de 4,15 kg de sel réactif MnCl₂ et cyclant 3,35 kg de gaz réactif NH₃) et un expandeur est de type scroll (nominal 1 kWméca).

*Intervenant

†Auteur correspondant: maxime.perier-muzet@univ-perp.fr

Le poster présentera une première analyse par simulation dynamique du couplage réacteur /expandeur, ainsi que l'avancement du prototype et les premières analyses expérimentales du fonctionnement d'un tel cycle thermochimique hybride.

Mots-Clés: Procédé thermochimique, cogénération froid / électricité, stockage thermochimique

Etude expérimentale d'un échangeur-stockeur avec matériaux à changement de phase pour la production d'eau chaude sanitaire

Maxime Thonon ^{‡§ 1}, Eric François ², Antoine Leconte ³, Laurent Zalewski ⁴, Gilles Fraisse ⁵, Mickael Pailha ⁵

¹ Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, 73000 Chambéry, France – University of Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac – France

² univ. Grenoble Alpes, CEA LITEN, Campus INES – CEA-LITEN – 73375 le Bourget du Lac, France, France

³ univ. Grenoble Alpes, CEA LITEN, Campus INES – CEA-LITEN – 73375 Le Bourget du Lac, France

⁴ LGCgE, Université d'Artois, ULR 4515 – Université d'Artois – F-62400 Béthune, France

⁵ LOCIE, université Savoie Mont-Blanc – Université de Savoie – 73000, Chambéry, France

Dans le cadre du projet ANR EUROPA, un échangeur-stockeur avec matériaux à changement de phase (MCP) a été conçu afin de réduire l'encombrement par rapport aux ballons solaires pour le stockage d'eau chaude sanitaire (ECS). Le système développé permet de fonctionner selon trois modes opératoires : 1/ la charge simple (en présence d'apports solaires et sans soutirage d'ECS), 2/ la décharge simple (lors de soutirages d'ECS en l'absence d'apports solaires), 3/ la charge-décharge simultanée (lorsque les apports solaires coïncident avec les soutirages d'ECS). Le MCP retenu comme matériau de stockage est la paraffine RT58, c'est un MCP qui a été caractérisé et modélisé dans de précédents travaux (1). Le MCP est contenu dans des cavités parallélépipédiques assemblées en parallèle. Chaque cavité est fermée par deux échangeurs plans, un échangeur solaire pour la charge et un échangeur d'ECS pour la décharge. Dans chaque cavité, des ailettes verticales en aluminium relient les échangeurs solaires avec les échangeurs d'ECS et permettent d'assurer deux fonctions : 1/ l'intensification des transferts thermiques avec le MCP contenu entre les deux échangeurs (charge simple et décharge simple), 2/ un transfert de chaleur direct à travers les ailettes entre les deux échangeurs (charge et décharge simultanée). Une maquette de la cavité de stockage à échelle réduite été étudiée en conditions contrôlées et modélisée numériquement avant la conception du prototype (2).

Les premiers résultats du prototype fabriqué par la société DATE et en cours de test sur le site du CEA sont attendus pour ce printemps. Le plan d'expérience comprend des essais unitaires et des essais système. Les premiers sont inspirés de la norme NF EN 12897+A1:2020 et incluent des charges et décharges simples ainsi qu'un test d'échange direct (charge et décharge simultanée). Les essais systèmes s'appuient sur une séquence de 6 jours obtenue par la méthode TYPPS (3) permettant d'évaluer les performances annuelles de l'échangeur-stockeur en fonctionnement chauffe-eau solaire individuel pour les besoins d'une maison. L'instrumentation mise en place permet de déterminer les puissances délivrées et soutirées par les échangeurs ainsi que la température du MCP à différents endroits du stockage. A partir des résultats obtenus, les

[‡]Intervenant

[§]Auteur correspondant: maxime.thonon@univ-smb.fr

performances énergétiques du système de stockage sont évaluées et discutées.

- (1) M. Thonon, G. Fraisse, L. Zalewski, M. Pailha, Towards a better analytical modelling of the thermodynamic behaviour of phase change materials, *Journal of Energy Storage*. 32 (2020) 101826. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101826>.
- (2) M. Thonon, Y. Cherif, N. Cellier, L. Zalewski, G. Fraisse, Experimental and Numerical Investigation of Two Vertical Fins Geometry for a Paraffin-Based Phase Change Material, (2021) 11.
- (3) H. Sayegh, A. Leconte, G. Fraisse, E. Wurtz, S. Rouchier, Computational time reduction using detailed building models with Typical Short Sequences, *Energy*. 244 (2022) 123109. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123109>.

Mots-Clés: Stockage d'eau chaude sanitaire, Chaleur latente – Matériaux à changement de phase
– Etude expérimentale

Large scale thermochemical energy storage prototype using ettringite-based material

Noé Beaupere * ¹, Alexandre Malley-Ernewein * ¹, Tamar Nahhas * ¹,
Stéphane Ginestet * ^{† 1}, Gabriel Samson * ¹, Martin Cyr * ¹

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

At present, there is an intense research for developing alternative heat storage materials. Cementitious material with a high ettringite content can be considered as an effective storage material in a long- or short-term thermochemical storage system.

Its working principle is based on the reversibility of the conversion ettringite – metaettringite: during the charging phase the passage of a hot and dry gas allows the material to be dehydrated and the ettringite to be transformed into metaettringite ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 30\text{H}_2\text{O} + \text{heat} \leftrightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O} + 18\text{H}_2\text{O}$). The discharging phase involves the hydration of the material by the passage of a cold and humid gas that transforms the metaettringite into ettringite, which then release thermochemical energy.

A large-scale heat storage prototype designed for ettringite-based materials has been built and tested. The reactive material was tested in two shapes: self-supporting cylindrical monolith and batch of coarse crushed pieces. The results have shown the effectiveness of this material for domestic storage solar energy or for industrial waste heat valorization, at medium temperature. A special attention was paid to the material durability: on the one hand the heat transfer fluid can damage the monolith by forming cracks and lead to fluid flow bypass, thus limiting the efficiency of the heat storage; on the other hand, the presence of carbon dioxide in the heat transfer fluid can cause the carbonation of ettringite, which affects the reversibility of the overall process.

Mots-Clés: thermochemical energy storage, ettringite, cementitious material, renewable energy

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: stephane.ginestet@insa-toulouse.fr

Séchoir solaire avec stockage thermique de type thermocline

Salifou Tera ¹, Oumar Sanogo ², Benoit Stutz ^{*† 3}

¹ Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT) – Ouagadougou 03 B.P. 7047, Burkina Faso

² Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT) – Burkina Faso

³ Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) – Université Savoie Mont Blanc : UMR5271 / FRE3220, Centre National de la Recherche Scientifique – Campus scientifique Savoie Technolac 73376 Le Bourget du Lac - CEDEX, France

Le séchoir solaire indirect associant un collecteur solaire à une chambre de séchage est couramment utilisé dans les pays en voie de développement par les coopératives et les groupements de femmes qui sont les plus actives dans ce domaine. L'intégration stockage thermique au système permet de poursuivre le procédé de séchage lorsque l'énergie solaire n'est plus disponible, permettant ainsi d'augmenter la contribution de l'énergie solaire dans ce procédé de transformation agroalimentaire par séchage. Dans le cadre de cette étude, nous étudions l'association d'un séchoir solaire indirecte à un système de stockage de type thermocline mettant en œuvre de l'air comme fluide caloporteur et du granit comme matériau de stockage. Durant la journée, une part de l'air chaud provenant du collecteur solaire sert à sécher les aliments. Le complément circule de haut en bas dans le lit de pierre du réservoir de stockage thermique. La nuit, la chambre de séchage est alimentée, par convection naturelle, en air chaud et sec issue du réservoir de stockage, ouvert à sa base à l'air extérieur. Deux modèles à une dimension décrivant le comportement thermique et énergétique du stockage ont été développés : un modèle à une équation regroupant les phases fluide, solide et paroi, et un modèle à trois équations prenant en compte séparément les bilans d'énergie de la phase fluide, de la phase solide et de la paroi. Ces modèles, résolus par la méthode des volumes finis, ont été validés avec des résultats de la littérature. Le débit circulant dans le système en phase de décharge est déterminé au moyen d'un bilan de quantité de mouvement en régime stationnaire sur l'air contenu dans le système. Des simulations numériques sont réalisées au cours des phases de charge et de décharge. L'impact de différents paramètres sont étudiés afin de pouvoir optimiser le dimensionnement du système : la taille des cailloux constituant le stockage thermique, la hauteur du lit de pierre ainsi que la répartition du débit d'air entre la chambre de séchage et le réservoir de stockage lors de la phase de stockage.

Mots-Clés: Séchoir solaire, stockage thermique, modélisation

*Intervenant

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

Évaluation de la performance exergétique lors du cyclage d'un stockage de type thermocline intégré à une centrale solaire thermodynamique

Quentin Falcoz ^{*} ¹, Ségolène Vannerem ², Pierre Neveu ³

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

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

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

Une campagne expérimentale est menée sur un prototype de centrale solaire afin d'étudier le comportement en cyclage d'un stockage de type thermocline. La centrale MicroSol-R comprend trois collecteurs cylindro-paraboliques et une résistance électrique permettant de chauffer le fluide caloporteur lors de la charge, un stockage à garnissage de 107 kWh et un générateur de vapeur pour la production en décharge. Le fluide caloporteur utilisé est de l'huile thermique Jarysol® tandis que le lit fixe est constitué de billes d'alumine de 2 cm de diamètre.

Des cycles successifs sont réalisés entre une température basse $TL = 100$ °C et une température haute $TH = 140$ °C avec une vitesse interstitielle du fluide de 1,5 mm.s-1. En raison des contraintes liées au dispositif, seuls cinq cycles expérimentaux sont réalisés. Des cycles numériques sont simulés dans les mêmes conditions jusqu'à ce que le régime stationnaire périodique soit atteint au sixième cycle. Deux indicateurs de performance sont analysés : le taux d'utilisation et l'efficacité exergétique. L'efficacité exergétique est décomposée comme le produit de l'efficacité énergétique et d'un nouvel indicateur : le facteur de qualité du stockage. La première est un indicateur de l'isolation thermique tandis que le second évalue la dégradation du contenu exergétique du processus de stockage/déstockage.

L'évolution de ces indicateurs au cours des cycles est étudiée. Les expériences et les simulations montrent un bon accord : le taux d'utilisation diminue du fait de l'épaississement de la thermocline et se stabilise autour de 53 % pour les seuils d'arrêt choisis. À l'inverse, l'efficacité exergétique augmente au cours des cycles suite à la diminution des pertes thermiques. En effet, au cours des cycles les charges commencent avec l'énergie résiduelle de la décharge précédente, ce qui réduit leur durée. Le stockage est donc à une température élevée pendant un temps plus court, diminuant les pertes thermiques et améliorant l'efficacité énergétique. Par ailleurs, le facteur de qualité du stockage diminue légèrement au fil des cycles car la stratification thermique se dégrade. Cependant, sa valeur expérimentale reste très élevée ($> 0,985$), montrant que l'énergie est déchargée à une température proche de celle à laquelle elle est stockée. Ceci démontre que le

*Intervenant

fonctionnement d'un stockage de type thermocline est en fait proche de celui d'un système idéal à deux réservoirs.

Le taux d'utilisation et l'efficacité exergetique présentent donc des comportements différents : l'évolution de la performance du stockage au cours des cycles dépend de l'indicateur considéré. La stratégie de fonctionnement du stockage doit donc être choisie en fonction des procédés situés en amont et en aval (par exemple le collecteur solaire et le générateur de vapeur dans le cas d'une centrale solaire cylindro-parabolique) et de la stratégie opératoire considérée.

Mots-Clés: Stockage thermocline, Cycles, Centrale solaire cylindro, parabolique

Etude expérimentale d'un démonstrateur de valorisation de l'énergie solaire thermique des routes pour les besoins des bâtiments

Prince Sevi ^{*† 1}, Benoit Stutz ¹, Frédéric Bernardin ², Alexandre Cuer ²

¹ LOCIE – Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR 5271 – 60, avenue du lac Léman, 73370 Le Bourget-du-lac, France

² Cerema Equipe-projet STI (Cerema Equipe-projet STI) – Cerema Centre Est – 8 – 10 rue Bernard Palissy - ZI du Brézet - 63017 CLERMONT FERRAND Cedex, France

En France, le réseau routier peut constituer un capteur d'énergie solaire très important. Le seul réseau national pourrait capter une énergie solaire d'environ 196 TWh par an. On voit dès lors le rôle important que peuvent jouer les infrastructures routières dans la transition énergétique. Cette énergie peut par exemple, être mise au profit du secteur du bâtiment qui représente près de 43% de la consommation totale d'énergie utile en France. Pour mieux exploiter ce potentiel énergétique des routes, plusieurs projets de routes récupératrices d'énergies ont vu le jour dont le projet Dromotherm (<http://www.dromotherm.com>) sur lequel porte cette présente étude, financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes dans le cadre du pack Ambition Recherche 2020-2025. Ce projet vise à récupérer l'énergie solaire thermique des chaussées (via une circulation d'eau dans une couche d'enrobé drainante comprise entre deux couches d'enrobé étanches) ; la stocker à la base des bâtiments dans une cuve isolée en béton, remplie de sable saturé en eau et de tubes géothermiques pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des bâtiments. A travers cette étude, nous concevons un démonstrateur de stockage inter-saisonnier couplé à un échangeur de chaleur routier de type Dromotherm. Nous avons développé un modèle global de simulation d'un tel dispositif afin d'étudier son comportement énergétique dynamique sur une année type. Un prototype à taille réelle a été construit pour servir de plateforme expérimentale. Nous présentons dans cette étude une validation de notre modèle de simulation à travers une comparaison avec nos mesures expérimentales.

Mots-Clés: Energie solaire, Echangeur de chaleur routier, Pompe à chaleur, Stockage thermique inter saisonnier

*Intervenant

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

Projet CHATO : des matériaux de stockage thermique locaux en Occitanie

Charles Devise ^{*† 1}, Yasmine Lalau ¹, Doan Pham Minh ¹, Guilhem Dejean ², Nicolas Tessier-Doyen ³

¹ Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés, des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement (RAPSODEE) – IMT Mines Albi – Campus Jarlard - Route de Teillet 81013 ALBI Cedex 09, France

² Eco-Tech Ceram (ETC) – Eco-tech Ceram – Rue Edouard Belin 66 600 Rivesaltes, France

³ Institut de Recherche sur les CERamiques (IRCER) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7315 – Centre Européen de la Céramique, 12 Rue Atlantis, 87068 LIMOGES CEDEX, France

Les centrales solaires à concentration sont des systèmes de conversion de l'énergie solaire en chaleur et en électricité robustes et performants. Elles ne sont cependant pas considérées parmi les technologies à déployer en France dans les scénarii de transition énergétique (négaWatt, Ademe, RTE), et prennent une faible part à l'international : l'IRENA prévoit une capacité installée en 2030 de 200 GW, soit moins de 2% des capacités renouvelables planifiées (1). Un des freins majeurs à ce déploiement réside dans le coût de l'énergie produite, lié au coût d'investissement : malgré une impressionnante réduction récente à l'international (15 €/MWh en Chine, 7 €/MWh au Chili), la France demeure au niveau du début des années 2010 (35 €/MWh) (2). Le système de stockage représente en moyenne 15% du coût d'investissement (2), et 20% des impacts environnementaux de la centrale (3) : il s'agit d'un élément crucial à la flexibilité de l'énergie produite, mais dont les performances peuvent être améliorées. Les matériaux de stockage thermique développés dans le cadre du projet CHATO pourraient répondre à ce double enjeu, en proposant des matériaux à bas coût et faible impact environnemental.

La performance d'un matériau de stockage est liée à la fois à sa capacité thermique, sa densité mais aussi résistance aux dégradations physico-chimiques en conditions opératoires. Les matériaux céramiques présentent l'avantage de résister à des hautes températures et sont peu sensibles aux agressions chimiques, ce qui en fait un matériau adapté à ce type d'utilisation.

De récents travaux ont développé des céramiques à base de mélanges argileux et de phosphates (4) ou de déchets industriels (5) pour le stockage thermique ; les meilleures formulations pouvant atteindre une capacité de stockage thermique volumique de 2430 kJ.m⁻³.K⁻¹. Afin de concevoir des matériaux performants à bas prix et faible impact environnemental, nous proposons d'étudier un système composé d'argiles et de charges minérales issues de la revalorisation de céramiques en fin de vie dans le but de dépasser la valeur de 2600 kJ.m⁻³.K⁻¹.

Un *screening* des matrices argileuses et charges minérales correspondant au cahier des charges est d'abord réalisé, puis ces matières premières sont caractérisées (compositions chimiques et minéralogiques, masse volumique, capacité calorifique, granulométrie). Une optimisation de la formulation en fonction de la distribution granulométrique des constituants est effectuée dans

*Intervenant

†Auteur correspondant: charles.devise@mines-albi.fr

l'objectif de maximiser la compacité de l'empilement granulaire. Ensuite, ces matières sont mélangées et la mise en forme s'opère par pressage uni-axial sous forme de pastilles afin d'étudier leur cohésion en cru puis de caractériser leurs propriétés thermo-physiques et mécaniques après traitement thermique. Cette communication présente la méthodologie suivie pour l'élaboration de matériaux répondant aux critères de performances établis, ainsi que des résultats préliminaires.

- (1) IRENA, "World Energy Transitions Outlook 2022", 2022
- (2) IRENA, "Renewable Power Generation Costs", 2021
- (3) J. J. Burkhardt et al., Environ. Sci. Technol, 2011, 45, 6
- (4) A. R. Sane, "Matériaux à base de phosphates pour le stockage thermique de l'énergie", 2017
- (5) N. Lopez Ferber, "Validation expérimentale d'un système de stockage thermocline air/céramique à échelle pilote" 2018

Mots-Clés: Stockage thermique, Chaleur fatale, Revalorisation, Thermocline

Modeling of local energy resource potential: Identification of the energy vector combination

Nader Koubaytri * ¹, Apolline Ferry ¹, Stéphanie Giroux ², Christophe Menezo ¹

¹ LOCIE UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc- Solar Academy , F-73376 Le Bourget-du-Lac

² CETHIL UMR 5008, Université Claude Bernard Lyon1, F-69621 Villeurbanne

As the weather changes locally, the production of solar energy is less predictable. It might alter seasonally and even hourly. Within the falling price of solar panels, solar energy is expeditiously replacing several unsustainable energy sources. Furthermore, it is known that solar energy is only created when the sun shines on the solar panels, which implies that the panels produce no energy for several hours each day. Therefore, coming up with ways to store the energy generated during peak sunlight hours is crucial so that we can access it later when the sun has set. It is significantly more difficult to figure out how to store solar energy than it is to generate it in the first place. The aim of this following research is to investigate different energy storage systems for seasonal storage, using the excess of solar energy, through hydrogen production as an energy vector as well as the pumped storage hydropower instead of the electrochemical energy storage system that serves as a short term energy storage. Moreover, putting solar energy to use in the automation industry is a technological revolution in itself, accordingly, the exploration of the system operation is fully implemented using a programmable logic controller, to reduce human intervention to the minimum for better sustainability, accuracy, and reliability.

Mots-Clés: Stockage d'énergie, Gestion de l'intermittence, multi-vecteurs énergétiques

*Auteur correspondant: nader.koubaytri@etu.univ-smb.fr