

# 2016 - 2019

## RAPPORT SCIENTIFIQUE

### Laboratoire PROcédés, Matériaux et Energie Solaire



© Frésillon Cyril - CNRS





# 2016 - 2019

RAPPORT SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE PROMES

**PROcédés Matériaux et Energie Solaire**  
**UPR 8521 du CNRS**  
**conventionnée avec l'Université de Perpignan**

Directeur : Alain Dollet  
Directrice adjointe : Marianne Balat-Pichelin  
7 rue du four solaire, Odeillo - 66120 FONT-ROMEUE, France  
Tél : 33 (0) 468 307 700

Rambla de la thermodynamique, Tecnosud - 66100 PERPIGNAN  
Tél : 33 (0) 468 682 222

[www.promes.cnrs.fr](http://www.promes.cnrs.fr)



7 > 8

PROMES en chiffres

9 > 12

Introduction

## Axe 1: Matériaux et conditions extrêmes

Equipes de Recherche



15 > 22

**S2N-POEM**

Systèmes et Structures  
Nanométriques :  
propriétés optiques,  
électroniques et  
magnétiques



23 > 31

**PPCM**

Photovoltaïque,  
Plasmas,  
Couches Minces



33 > 40

**MHTCS**

Matériaux Hautes  
Températures et  
Carburants Solaires

## Axe 2: Conversion, stockage, transport de l'énergie

Equipes de Recherche



43 > 49

### TRECS

Thermophysique,  
Rayonnement et  
Ecoulement pour les  
Centrales Solaires



51 > 58

### SHPE

Stockage pour  
Hélioprocédés  
Photochimique  
et Energétique



59 > 69

### TES

Thermodynamique,  
Energétique et  
Systèmes réactifs



71 > 78

### COSMIC

Commande des  
Systèmes,  
Instrumentation et  
Caractérisation



79 > 86

### SENSE

Supervision,  
Énergie solaire,  
Systèmes Électriques

> 87

FR - SOLARIS

91 > 106

Les services

**PCM**

Plateforme de Caractérisation  
des Matériaux

**SISIA**

Service des Installations Solaires  
et Instruments Associés

107 > 108

Fait marquant

111 > 138

Bibliographie



## EN CHIFFRES

150 PERSONNES

45

chercheurs/ens.  
chercheurs

35

ingénieurs et  
techniciens

50

doctorants  
Post-doctorants

20

contractuels

### Personnel

Centre du Four Solaire  
Félix Trombe  
Odeillo  
Centrale Solaire Thémis  
Targassonne

Centre de Tecnosud  
Perpignan

3

SITES

### Moyens

DES INSTALLATIONS  
SOLAIRES UNIQUES

Infrastructure nationale du CNRS  
**FR-SOLARIS**

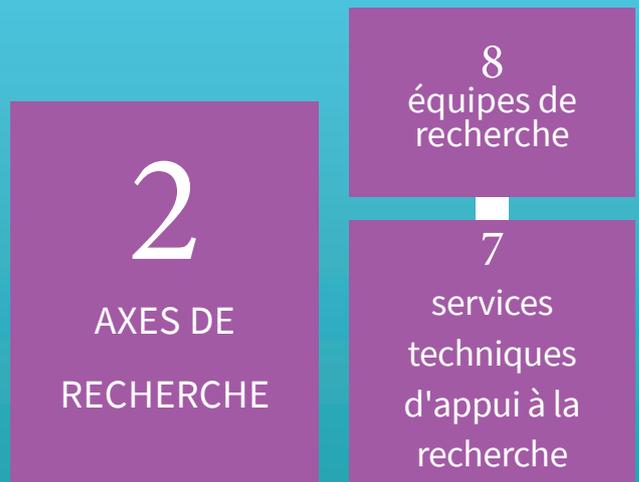
### International

Projet d'Infrastructure  
Européenne sur le  
Solaire Concentré  
EU-SOLARIS

2

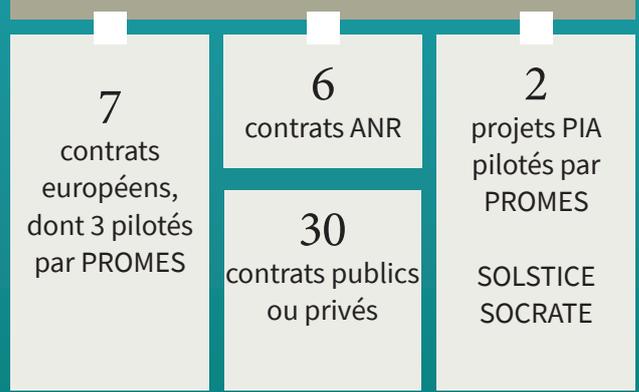
réseaux internationaux  
de recherche  
SINERGIE (Singapour)  
NMC (Canada)

# EN CHIFFRES



## Recherche

45 CONTRATS DE RECHERCHE SIGNÉS



## Production Scientifique



Master Electronique, Energie électrique, Automatique: parcours Automatique et Systèmes embarqués pour la gestion des énergies

Master "Energie, parcours matériaux et procédés solaires"

Master Européen EUREC "Association of European Renewable Energy Research Centers" Spécialisation énergie solaire thermique

Ecole d'Ingénieurs SupEnR

Formation de Master / ingénieurs avec l'Université de Perpignan Via Domitia



**ALAIN DOLLET**  
Directeur

# Introduction

Le laboratoire PROCédés, Matériaux et Energie Solaire (PROMES) est une unité de recherche du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), rattachée à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) du CNRS et conventionnée à l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). L'effectif est d'environ 150 personnes réparties dans 3 sites géographiques distants de 100 km : Perpignan et Odeillo/Targassonne (figure 1). Plus de 80 permanents (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs), une cinquantaine de doctorants et post-doctorants ainsi qu'une vingtaine de contractuels poursuivent des recherches sur l'énergie solaire et ses applications, tout particulièrement sur l'énergie solaire concentrée.

Ces recherches qui sont menées au sein de 8 équipes, appuyées par 7 services (figure 2), se déclinent à travers 2 axes principaux : i) Matériaux et Conditions extrêmes, ii) Conversion, Stockage et Transport de l'Energie, auxquels il convient d'ajouter un 3ème axe transversal dédié au solaire concentré.

Le laboratoire opère les grandes installations solaires à concentration qui constituent l'infrastructure nationale de recherche FR-SOLARIS. Ces installations sont localisées à Odeillo (fours solaires du CNRS en particulier) et à Targassonne (centrale solaire à tour Thémis, propriété du Conseil Départemental des Pyrénées Orientales). FR-SOLARIS est le nœud français du projet européen EU-SOLARIS, qui vise à la création d'une infrastructure de recherche distribuée de rang mondial, réunissant les principales installations européennes dans le domaine du solaire concentré (8 pays). EU-SOLARIS pourrait être

créée dès 2021, avec une structure légale d'ERIC. Dans la perspective de la création de cette infrastructure, depuis plusieurs années, PROMES accueille chaque année 10 à 15 équipes de recherche étrangères dans le cadre des projets européens d'infrastructure SFERA (Solar Facilities for the European Research Area, phase 3 en cours). Le laboratoire coordonne 3 projets de recherche FP7 ou H2020 qui mettent en œuvre ses grandes installations solaires (SOLPART, NEXT-CSP, POLYPHEM) et il participe à plusieurs autres projets européens. Au plan national, PROMES pilote le projet d'équipement d'excellence SOCRATE (Solaire Concentré: Recherches Avancées et Technologies Energétiques) - qui a permis l'acquisition d'une micro-centrale cylindro-parabolique de 150 kWth et la jouvence d'une partie des installations solaires - ainsi que le projet de laboratoire d'excellence SOLSTICE (SOLAire: Sciences, Technologies, Innovations pour la Conversion d'Energie), qui implique également 2 autres laboratoires de la région Occitanie (IES à Montpellier et RAPSODEE à Albi).

Le laboratoire est très présent au plan international : il représente la France au comité exécutif de SolarPACES (SOLAR Power And Chemical Energy Systems, qui est une tâche de l'Agence Internationale de l'Energie) et il anime 2 réseaux de recherche internationaux du CNRS sur les énergies renouvelables (SINERGIE, French-SINGaporean network on renewable enERGIEs, avec Singapour) et sur les matériaux (NMC, Nanomatériaux Multifonctionnels Contrôlés, avec le Canada).

PROMES est également très impliqué dans la formation via l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). Les Enseignants-chercheurs du laboratoire sont à l'origine de la création de nombreuses filières d'enseignement de la Faculté des Sciences Exactes et Expérimentales (SEE) de l'UPVD et ils dirigent le département des Sciences pour l'Ingénieur (SPI) de cette faculté depuis plusieurs années. Parmi les formations "Phare" pilotées par le laboratoire, on peut citer tout particulièrement les Masters "Energie" et "Electronique, Energie électrique, Automatique" ainsi que la spécialité "Solaire Thermique" du Master Européen EUREC. Les enseignants-chercheurs de PROMES pilotent la formation d'Ingénieurs "SupEnR" sur les Energies Renouvelables créée en partenariat avec l'INSA de Toulouse en 2016. De nombreux chercheurs CNRS, Ingénieurs et doctorants du laboratoire participent également à l'animation de toutes ces formations.

Le présent rapport scientifique présente une synthèse des activités de recherche du laboratoire sur la période 2016-2019, pour chacune des 8 équipes. Il comporte également un bilan de l'activité des 2 services les plus directement impliqués dans la Recherche (SISIA et PCM).

L'année 2019 a été marquée par les célébrations du cinquantième anniversaire du grand four solaire d'Odeillo (organisées dans le cadre des 80 ans du CNRS) en présence de Monsieur Antoine Petit, PDG du CNRS, et de nombreuses personnalités. Ces célébrations, brièvement évoquées dans ce rapport, ont permis au public de découvrir le four solaire et la recherche réalisée au CNRS sur l'énergie solaire.

Alain Dollet

Directeur du laboratoire PROMES



Figure 1: sites de Perpignan (en haut), Odeillo (en bas à gauche) /Targassonne (en bas à droite)



Figure 2: Organigramme fonctionnel du laboratoire PROMES



# AXE 1: MATÉRIAUX ET CONDITIONS EXTRÊMES



15 > 22

S2N-POEM



23 > 31

PPCM



33 > 40

MHTCS





## Présentation de l'équipe

Responsable : F. Vernay (PR UPVD)

Permanents : N. Barros (MCF UPVD), R. Bastardis (MCF UPVD), H. Kachkachi (PR UPVD), E. Nadal (MCF UPVD)

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : E. Nadal (date soutenance : 27/11/17); (2) thèses en cours : M. Maurice (début 10/18)

Post doctorants : G. Desalegn (période 11/17-11/18)

Mots clés

Nanostructures, Magnétisme, Plasmonique, Caractérisations optique et magnéto-optique, Transport et conversion d'énergie.

Références

10, 17, 81, 104, 126, 166, 172, 179, 198, 520, 565, 613, 639, 646, 655, 660, 679, 692, 693, 706, 710, 715, 719, 720, 725.

- en bref -



### THÈMES

1. Nanomagnétisme
2. Plasmonique
3. Magnéto-plasmonique

### COLLABORATIONS

#### Collaborations nationales

ILM (Lyon), IPCMS (Strasbourg),  
ICMPE (Thiais), CEMES (Toulouse),  
LPCNO (Toulouse), GEMAC  
(Versailles)

#### Collaborations internationales

Allemagne : Universität Duisburg-  
Essen, AG Farle (Duisburg)  
Chili : Universidad Mayor (Santiago)  
Espagne : Universitat de Barcelona,

Dept. de Fisica de la Materia  
Condensada (Barcelona)

USA : Lehman College of the City  
University of New York (New York),  
SLAC Stanford University (Palo Alto)

## • Rapport Scientifique •

### Introduction

#### Contexte

L'équipe, Systèmes et Structures Nanométriques: Propriétés Optiques, Electroniques et Magnétiques (S2N-POEM), est formée d'enseignants-chercheurs issus de divers horizons avec des compétences complémentaires en science fondamentale. L'équipe développe deux volets de recherche corrélés : une approche théorique couplée à des expériences menées au sein de l'équipe. S2N-POEM a intégré le laboratoire PROMES en septembre 2011 sur la base de son savoir-faire dans le domaine des nanomatériaux, pour apporter son concours dans l'étude de processus fondamentaux de conversion de l'énergie grâce à des matériaux nanostructurés. Le centre d'intérêt principal de l'équipe était alors le nanomagnétisme, mais l'équipe S2N-POEM a peu à peu tourné ses activités vers les processus de conversion d'énergie (hyperthermie magnétique) et le contrôle de la lumière à l'échelle nanométrique (plasmonique et magnéto-plasmonique) en vue d'améliorer les performances optiques de matériaux utiles à la conversion d'énergie solaire ou en vue de réaliser de la photocatalyse solaire.

#### Objectifs scientifiques

L'objectif scientifique principal de S2N-POEM consiste à comprendre les propriétés optiques de nano-éléments et de matériaux nanostructurés. Nous étudions, à la fois du point de vue théorique et expérimental, les moyens d'optimisation de ce type de matériaux en vue d'applications dans le domaine de la conversion et du transport de l'énergie. L'ensemble de nos activités de recherche fait donc appel, d'une part, à des méthodes théoriques de physique statistique, classique et quantique, à l'équilibre et hors équilibre, pour prendre en compte les effets de surface et d'interactions intra- et inter-particules ; et, d'autre part, à des approches expérimentales de fabrication et caractérisation optique et magnéto-optique d'assemblées de nanoparticules. Nous nous intéressons aux processus de conversion de l'énergie à travers trois domaines connexes : le nanomagnétisme, la nanoplasmonique et la magnéto-plasmonique.

## 1. Nanomagnétisme

Les recherches de l'équipe dans le domaine du nanomagnétisme sont bien connues au niveau national et international. En particulier, l'équipe a montré au cours des années une double compétence dans ce domaine : la modélisation des effets de surfaces (propriété intrinsèque des nanoparticules), et la prise en compte des interactions dipolaires qui induisent des effets collectifs dans les assemblées de nanoparticules.

### 1.1 Effets de surface

L'une des applications du nanomagnétisme est le stockage de l'information, chaque bit étant associé à un nano-aimant, dont l'état up ou down représente l'information 0 ou 1. En ce sens, écrire une nouvelle information implique d'être capable de réaliser des retournements de l'aimantation à l'échelle nanométrique. De plus, pour que le processus soit utile, il faut que ce retournement soit réalisé de façon rapide, fiable et efficace. Comme le nombre d'atomes à la surface d'un nano-objet peut être plus grand que le nombre d'atomes de cœur, nous comprenons dès lors qu'il devient essentiel de caractériser les propriétés de surface et de pouvoir les quantifier grâce à des techniques de mesure.

Nous avons montré qu'une technique de mesure bien connue, la résonance ferromagnétique (FMR), fournit des spectres dans lesquels il est possible de distinguer et de déterminer le rôle des spins de surface et des spins de cœur. Pour ce faire, nous avons considéré des nanoparticules cubiques décrites par un hamiltonien prenant en compte chaque spin atomique. Ainsi, nous avons intégré dans notre approche les différentes anisotropies entre spins de cœur et spins de surface, et l'échange spin-spin d'Heisenberg, comme indiqué en figure 1 ci-dessus. Nous avons alors étudié l'effet de l'anisotropie de surface sur le spectre des excitations d'onde de spin dans un nano-cube magnétique et avons calculé la puissance absorbée correspondante. Pour cela, nous avons développé une méthode numérique générale basée sur l'équation de Landau-Lifschitz, linéarisée autour de l'état d'équilibre conduisant à un problème de valeur propre résolu à l'aide d'une technique symplectique. Les résultats numériques ont été comparés à la théorie des ondes de spin linéaires, ce qui nous a permis de déterminer les contributions des spins de cœur et de surface au poids spectral (voir figure 2) et à la puissance absorbée.

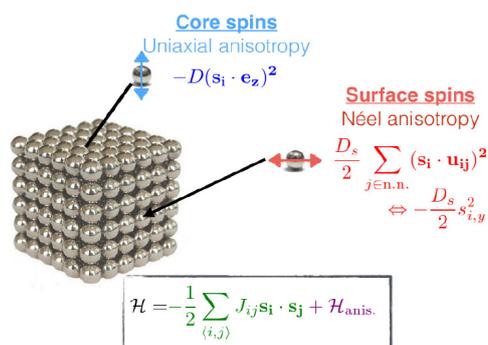


Figure 1 : Nanocube de fer, l'anisotropie des spins de surface diffère des spins de cœur



## 1.2 Compétition entre effets de surface et interactions dipolaires

La compétition entre les effets collectifs et intrinsèques est un des domaines d'étude pour lequel S2N-POEM a développé un savoir-faire et une méthodologie analytique originale.

Ainsi, nous avons initié une collaboration avec le Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets (LPCNO) de Toulouse afin d'identifier les paramètres permettant d'optimiser le processus d'hyperthermie magnétique. L'hyperthermie magnétique est un procédé réalisant une conversion d'énergie électromagnétique en chaleur de façon très ciblée et qui trouve donc son domaine d'application en médecine. Elle est réalisée en soumettant une assemblée de nanoparticules (NPs) magnétiques à un champ magnétique extérieur AC, le taux spécifique d'absorption d'énergie (SAR) est alors proportionnel à la surface de l'hystérésis, cette énergie est ensuite dissipée en chaleur. Notre approche a consisté à relier le SAR à la susceptibilité magnétique AC pour laquelle nous avons obtenu une expression analytique à partir du modèle de Debye. En substance, les formules que nous avons établies lient directement le SAR aux paramètres physiques microscopiques : anisotropies, force de l'interaction dipolaire et champ externe. Nous avons montré que, selon la géométrie de l'échantillon et la configuration expérimentale, l'interaction dipolaire et le champ DC externe peuvent entrer en compétition et conduire à une courbe en forme de cloche pour le SAR (avec un maximum, voir figure 3). En particulier, pour les assemblées 2D, nous avons constaté que le SAR est optimisé en appliquant un petit champ continu dans une direction perpendiculaire au plan de l'échantillon. Une expression analytique de l'intensité de ce champ optimal a été obtenue en fonction de l'interaction dipolaire.

Du point de vue de la communauté de l'hyperthermie magnétique, notre étude constitue une avancée importante pour le domaine ; en effet, notre approche analytique originale permet de préciser clairement le rôle de chaque degré de liberté physique du problème (anisotropie magnétique, champ dc, concentration de NPs). En ce sens, nous complétons les travaux numériques effectués par ailleurs. Pour ce qui concerne l'équipe, ces travaux, et le projet PEPS du CNRS que nous avons obtenu, formalisent une collaboration avec un autre laboratoire de la région Occitanie qui dispose de ressources complémentaires aux nôtres. En outre, nous voyons là une application directe de nos développements théoriques à la conversion d'énergie.

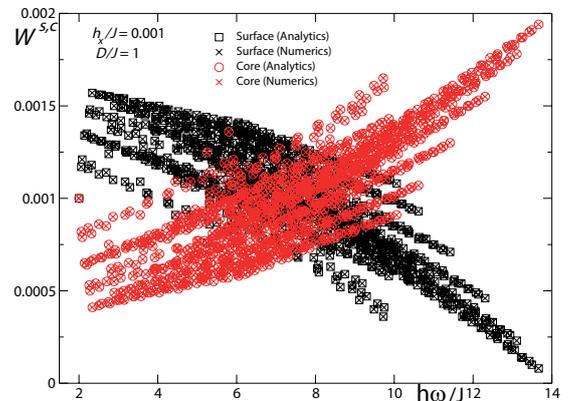


Figure 2 : Poids spectral des excitations d'ondes de spin dans une nanoparticule avec anisotropie uniaxiale uniforme, dans un champ magnétique. A basse énergie, le poids spectral de la surface est prépondérant

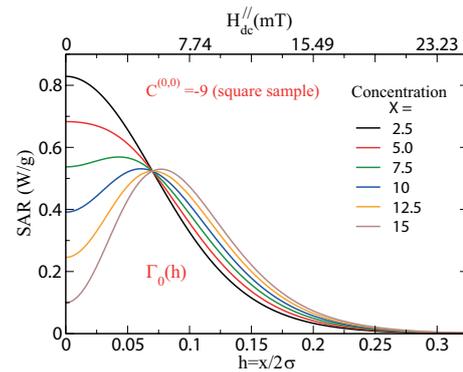


Figure 3 : SAR en fonction du champ DC pour des assemblées 2D de diverses concentrations. On constate que la compétition entre champ DC et interaction dipolaire induit la présence d'un maximum pour un champ non-nul dans les assemblées plus concentrées

## 2. Nanoplasmonique

Le développement des activités expérimentales de S2N-POEM a été concomitant à la thèse d'Elie Nadal. L'équipe a alors choisi de favoriser l'émergence d'un pôle de synthèse et caractérisation de nanostructures plasmoniques. Nous souhaitons en effet pouvoir mener des études complètes, expérimentales et théoriques, des plasmons de surfaces.

### 2.1 Synthèse et caractérisation

Les NPs métalliques absorbent l'énergie électromagnétique de la lumière incidente par l'intermédiaire d'excitations plasmoniques qui peuvent ensuite se coupler à d'autres excitations, offrant ainsi un canal pour la conversion et le transfert en une autre forme d'énergie. L'efficacité de ce type de mécanisme peut être contrôlée par la taille, la forme, l'environnement et l'arrangement spatial des nanoparticules. Il est donc tout à fait possible de contrôler la sélectivité spectrale et orientationnelle de ces nanoparticules en vue d'applications pratiques. Par exemple, cela peut s'appliquer à la conversion de l'énergie solaire par des nanostructures hybrides faisant intervenir des assemblées de nanoparticules métalliques et des matrices ou substrats semiconducteurs. Mais, avant de se tourner vers les applications, il est essentiel d'avoir une approche systématique complète en contrôlant chaque étape de l'étude : de la synthèse des échantillons à l'interprétation en passant par la caractérisation optique.

Dans cet objectif, nous avons développé une nouvelle méthode de synthèse visant à produire des réseaux de NPs d'or dans des films minces de polymères. Il s'agit de doper des films de polymères avec des précurseurs d'or puis de les irradier avec un motif d'interférence conduisant à la photo-réduction spatialement contrôlée des ions métalliques. Une procédure de recuit est ensuite utilisée pour induire la croissance de nanoparticules tout en maintenant l'organisation spatiale dans le film. L'étude des propriétés optiques de ces réseaux de nanoparticules a alors montré diverses propriétés originales dont une diffraction renforcée par les plasmons (voir figure 4).

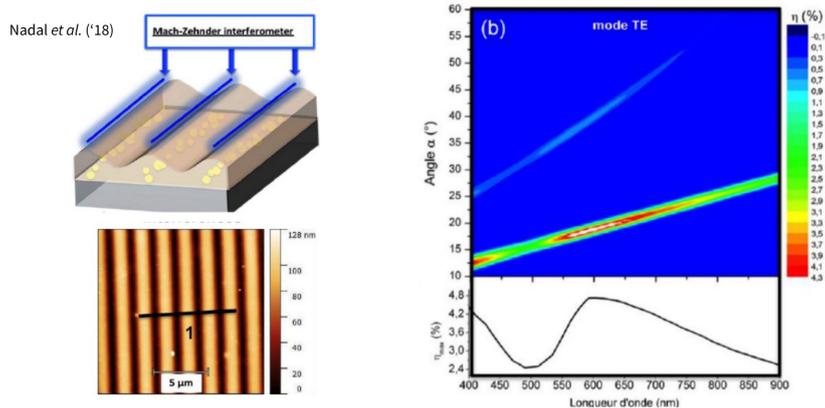


Figure 4 : Gauche : échantillon de NPs d'or arrangées en réseau de diffraction. Droite : intensité diffractée en fonction de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde incidente. On observe clairement un maximum d'intensité autour de la résonance plasmonique

L'originalité et l'utilité de la méthode pour la communauté réside dans le fait que nous utilisons une excitation laser continue de faible puissance dans le domaine visible, ce qui ouvre la voie à des processus de fabrication pour de grandes surfaces. En ce sens, les premiers pas prouvés par cette approche revêtent un intérêt particulier pour la réalisation de couches sélectives qui sont essentielles, par exemple, dans des applications liées au photovoltaïque (en particulier pour les cellules organiques) ou au solaire thermique. Ces travaux sur la nanoplasmonique marquent, pour S2N-POEM, la formalisation d'un virage thématique que nous avons abordé lors de la fin du plan précédent. La mise en œuvre de ces projets a permis d'établir une collaboration interne au laboratoire avec l'équipe PPCM (H. Glénat est co-auteur des articles publiés). Cette collaboration se consolide avec le dépôt, par l'équipe PPCM, de l'ANR PRCE NanoPIAST à laquelle nous participons pour la modélisation et la caractérisation de couches minces nanocomposites sélectives. Par ailleurs, à l'échelle nationale, les publications liées à cette activité scientifique ont permis de confirmer un nouveau partenariat avec l'ILM de Lyon qui a été amorcé grâce à un PEPS du CNRS.



## 2.2 Photocatalyse plasmonique directe

Les procédés d'oxydation avancée sont une famille de techniques visant à éliminer les micro-polluants organiques contenus dans l'eau grâce à leur oxydation par des radicaux hydroxyle produits in situ. Parmi ces procédés, l'un des plus étudiés est la photocatalyse par des semi-conducteurs (TiO<sub>2</sub>, ZnO...). Cependant, ce procédé nécessite l'utilisation de rayonnements ultraviolets de haute énergie, qui représentent une partie minime du spectre solaire. Pour une meilleure utilisation de la ressource solaire, il serait donc intéressant de concevoir des photocatalyseurs permettant d'utiliser la lumière visible.

Dans ce but, nous proposons d'utiliser des nanoparticules métalliques. En effet, ces dernières peuvent absorber le rayonnement visible de façon résonante, ce qui conduit à la création de champs électriques intenses au voisinage de la nanoparticule : ce phénomène est appelé résonance plasmon de surface. Il a été observé qu'associées à un semi-conducteur, ces nanoparticules permettent d'augmenter l'efficacité photocatalytique dans le domaine du visible. En outre, des études rapportent la dégradation de composés organiques en présence de lumière visible sous l'effet de nanoparticules métalliques seules. On parle alors de « photocatalyse plasmonique directe », les nanoparticules permettant alors de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie chimique. Les mécanismes régissant la photocatalyse directe par des nanoparticules métalliques sont complexes et font intervenir la génération, sous l'effet de la résonance plasmon, d'électrons de haute énergie appelés « électrons chauds ».

Nous étudions les propriétés photocatalytiques de films nanocomposites incluant des nanoparticules d'or ou d'argent pour la dégradation de composés organiques en milieu aqueux sous irradiation visible. L'objectif est de comprendre le lien entre les propriétés optiques des films, la génération d'électrons chauds et les taux de dégradation des molécules. Se pose en particulier la question de l'effet des couplages interparticules, qui conduisent à des « points chauds » correspondant à des champs électromagnétiques intenses (Figure 5). L'intérêt d'utiliser des films par rapport à des nanoparticules libres est de pouvoir contrôler les distances interparticules (et donc les couplages), ainsi que les conditions d'irradiation. Le projet est composé d'un volet théorique et d'un volet expérimental, qui sont tous deux effectués dans l'équipe S2N-POEM.

L'objectif du volet théorique est de développer un modèle permettant de décrire la génération d'électrons chauds dans une nanoparticule au sein d'un film nanocomposite sous l'effet d'un rayonnement incident, et leur transfert à des molécules adsorbées à sa surface.

L'idée est de pouvoir à terme simuler des films réalistes, en prenant en compte l'effet de différents paramètres comme la distribution de taille et de forme des nanoparticules ainsi que leur distribution spatiale.

Pour cela, nous nous basons sur un modèle proposé dans la littérature, qui combine le calcul classique des propriétés optiques via la résolution des équations de Maxwell, et la description quantique des états électroniques de la nanoparticule, et l'étendons afin de tenir compte des interactions interparticules au sein du film et de la présence des molécules. Ce travail, qui s'effectue de façon analytique et numérique, s'appuie sur les compétences en électromagnétisme, physique de la matière condensée et chimie quantique des différents membres de l'équipe S2N-POEM.

Le volet expérimental, vise dans un premier temps à démontrer l'efficacité des films pour la dégradation photocatalytique de composés organiques en milieu aqueux sous l'effet d'un rayonnement visible. Pour cela, nous utilisons des films nanostructurés fabriqués dans l'équipe S2N-POEM, ainsi que par des collaborateurs d'autres laboratoires. L'efficacité des échantillons est testée grâce à un montage dédié permettant l'irradiation par un laser ou un simulateur solaire et le suivi in situ de la dégradation par spectroscopie UV-visible.

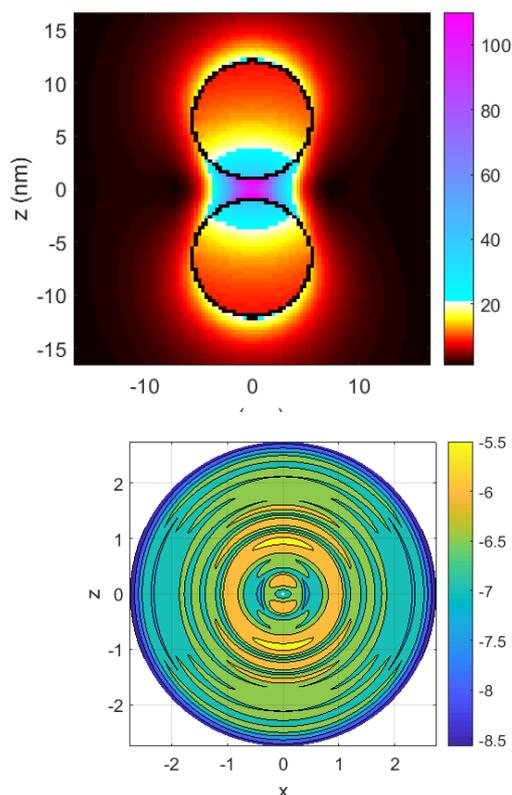


Figure 5 : haut : exaltation du champ électrique par un dimère de nanoparticules d'argent. Bas : densité d'électrons chauds générés dans une nanoparticule d'argent de 5 nm sous l'effet de la résonance plasmon (champ appliqué selon l'axe z)

### 3. Magnéto-plasmonique

La nanoplasmonique permet d'exalter, grâce à un phénomène de résonance, certaines longueurs d'onde. Pour les NPs de métaux nobles, les résonances plasmons ont des énergies de l'ordre de l'électron-Volt, ce qui correspond à la lumière visible. La position et la largeur de la résonance peuvent être adaptées en modifiant le matériau, la forme, la taille et la distribution des NPs, mais une fois l'échantillon synthétisé, ses propriétés optiques ne sont plus ajustables. Or, il pourrait être intéressant de contrôler la résonance grâce à un paramètre extérieur comme l'application d'un champ magnétique. Pour qu'un couplage magnéto-plasmonique soit possible, il faut avoir recours à des échantillons hybrides, constitués d'une composante magnétique et d'une composante métallique. Jusque-là, les effets (faibles) du couplage magnéto-plasmonique ont été mis en évidence dans des expériences sur des multi-couches, l'interprétation reste quant à elle cantonnée à des approches macroscopiques. Notre équipe a mis en place une activité de recherche visant à appréhender le mécanisme de couplage magnéto-plasmonique à l'échelle microscopique.

#### 3.1 Banc magnéto-optique - Rotation Faraday

Du point de vue expérimental, l'influence mutuelle des composantes magnétique et plasmonique peut être étudiée grâce au banc magnéto-optique qui a été monté au cours du plan et qui permet de mesurer la dépendance spectrale de l'effet Faraday ; celle de l'effet Kerr étant actuellement en cours de montage. Les expériences sont réalisées en transmission (effet Faraday) ou en réflexion (effet Kerr), avec un contrôle sélectif de l'état de polarisation de la lumière, en présence d'un champ magnétique. Le dispositif que nous avons monté dispose d'un mode de détection

large spectre, effectué avec un spectrophotomètre. Le développement réalisé cette année permet d'effectuer une mesure monochromatique, longueur d'onde par longueur d'onde, en ajoutant une modulation d'amplitude et une détection synchrone pour minimiser les bruits de mesures. Cette amélioration de la sensibilité est essentielle à l'étude des questions fondamentales concernant la nature du couplage magnéto-plasmonique.

La mise en place de ce banc de mesure magnéto-optique a été une priorité pour S2N-POEM puisque nous souhaitons que nos activités théoriques soient couplées sur site à une installation expérimentale à l'état de l'art. Cette réalisation a été possible grâce à l'engagement financier du laboratoire PROMES, de l'UPVD par des BQR que nous avons obtenus, et au recrutement d'un MCF expérimentateur.

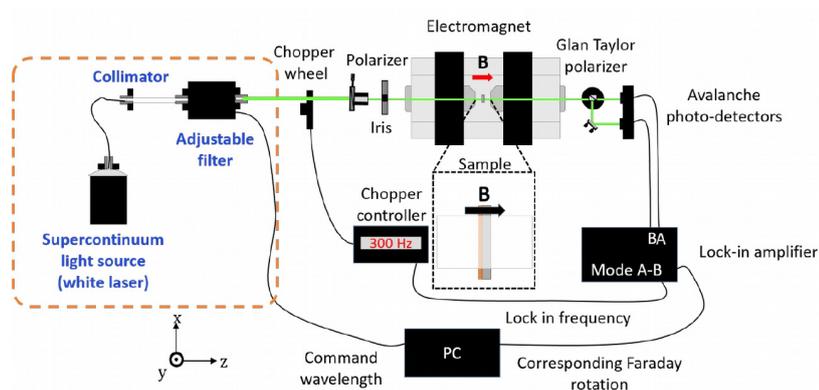


Figure 4 : Gauche : échantillon de NPs d'or arrangées en réseau de diffraction. Droite : intensité diffractée en fonction de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde incidente. On observe clairement un maximum d'intensité autour de la résonance plasmonique



## 3.2 Couplage magnéto-plasmonique et nutation du moment magnétique

Nous avons mené un travail théorique pour réconcilier l'échelle d'énergie plasmonique (~1 à 4 eV) aux énergies mises en jeu dans les excitations magnétiques standards de type ondes de spin (~10 à 100 meV), qui peuvent être deux ordres de grandeur plus faibles. Nous avons abordé une piste originale qui implique les effets d'inertie de la dynamique de l'aimantation et en particulier la nutation magnétique. Nous avons montré, en résolvant des systèmes d'équations couplés de Landau-Lifschitz pour décrire la dynamique de l'aimantation de nano-cubes magnétiques, que les effets de surface et les interactions d'échange induisent un phénomène de nutation dont la fréquence d'excitation (~1 THz) est bien plus élevée que la fréquence de précession (~10 GHz), soit deux ordres de grandeur. L'interprétation de la nutation, à l'aune d'un modèle analytique effectif, montre que nutation et précession sont liées par les non-homogénéités de l'aimantation au sein du nano-cube. Ainsi, par cette étude, nous montrons qu'une voie possible de couplage magnéto-plasmonique peut passer par la nutation du moment magnétique. Peu d'études ont été menées sur la nutation, à travers ce travail, notre équipe, non seulement propose une origine microscopique intrinsèque du phénomène, mais également suggère que la nutation dispose d'une fréquence qui peut s'adapter à la fréquence plasmonique. Actuellement, le couplage des équations de Landau-Lifschitz aux équations de Maxwell est en cours. En ce sens, ces développements marquent une étape théorique essentielle pour appréhender l'origine du couplage magnéto-plasmonique.

L'observation expérimentale du phénomène de nutation magnétique vient d'être faite par des mesures d'effet Kerr magnéto-optique résolu en temps par Kumar Neeraj et al. Les mesures ont été réalisées sur des films minces ferromagnétiques et les auteurs ont observé un signal à 0,6 THz, ce qui est de bon augure pour un couplage éventuel. Nous sommes actuellement en cours de montage d'un projet ANR international avec des collaborateurs à Duisburg sur ce sujet.

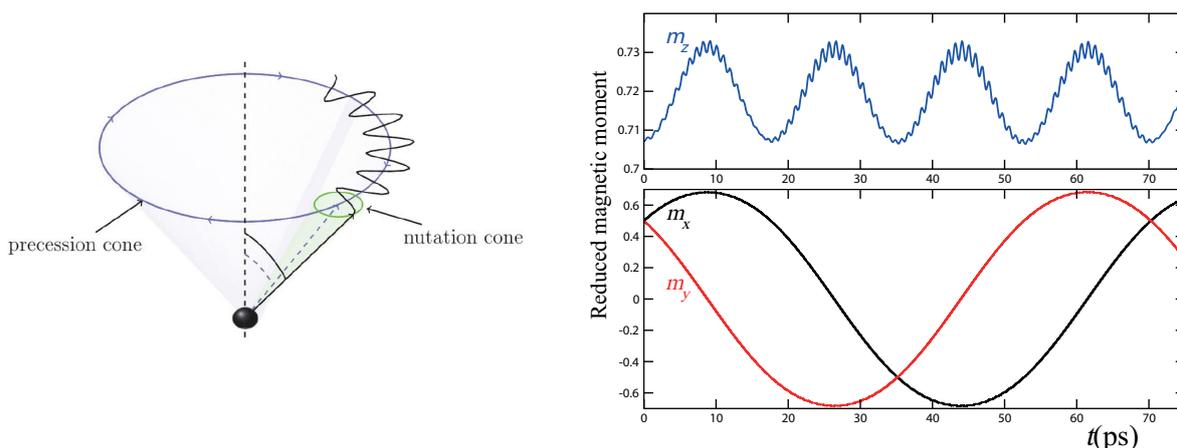


Figure 7 : Gauche : vue d'artiste de la nutation du moment magnétique. Droite : calcul des composantes de la résultante du moment magnétique d'une nanoparticule en fonction du temps. Les oscillations haute fréquence de la courbe bleue représentent la nutation.

## 3.3 Couplage magnétoplasmonique dans les semiconducteurs ferromagnétiques

Nous avons étudié un autre mécanisme de couplage magnéto-plasmonique dans le cadre du post-doctorat de G. Desalegn (financé par le Labex Solstice): un semiconducteur magnétique (FMS) associé à des NPs métalliques. L'idée originale étant que l'absorption de la lumière par les NPs excite des plasmons de surface qui se couplent aux degrés de liberté de spin et de charge du FMS. L'approche adoptée a été celle d'un modèle sd pour le FMS, les NPs étant modélisées comme des sources d'un potentiel électromagnétique modulé dans l'espace. Les fonctions de corrélations et observables physiques ont été obtenues grâce à la technique des fonctions de Green. L'analyse détaillée de ces résultats est en cours. Néanmoins, nous avons déjà pu observer que la dispersion des excitations basses énergies (magnons) est modifiée à cause de la présence des excitations de charges. L'effet est particulièrement visible en bord de zone de Brillouin.

Ainsi, la figure 8 montre le spectre d'excitation calculé pour un semiconducteur ferromagnétique usuel ; on y distingue nettement 3 contributions : (i) Un continuum électron-trou débutant à une énergie de 0,6eV au voisinage du centre de zone de Brillouin. (ii) Une branche d'excitation de plasmon optique (insert en haut à gauche) avec une courbure en  $q^2$  positive due à l'interaction plasmon-magnon. (iii) Une bande d'excitation de basse énergie (insert du bas) correspondant aux magnons et qui devrait avoir une énergie de  $4JS=8$  meV en bord de zone de Brillouin mais qui est renormalisée à 9 meV par le couplage plasmon-magnon.

Ces recherches de base sur l'origine du couplage magnéto-plasmonique ont un caractère original et marquant en ce sens qu'elles s'intéressent aux mécanismes à l'échelle de l'atome. La compréhension des phénomènes à cette échelle est nécessaire à la communauté pour in fine synthétiser des échantillons dont les propriétés optiques seront utiles à la conversion de l'énergie (optimisation de l'absorption, contrôle de la réflectivité, ...). La mise en place de cette thématique de recherche au sein de S2N-POEM s'est faite de façon volontariste en développant une synergie entre nos activités expérimentales et théoriques.

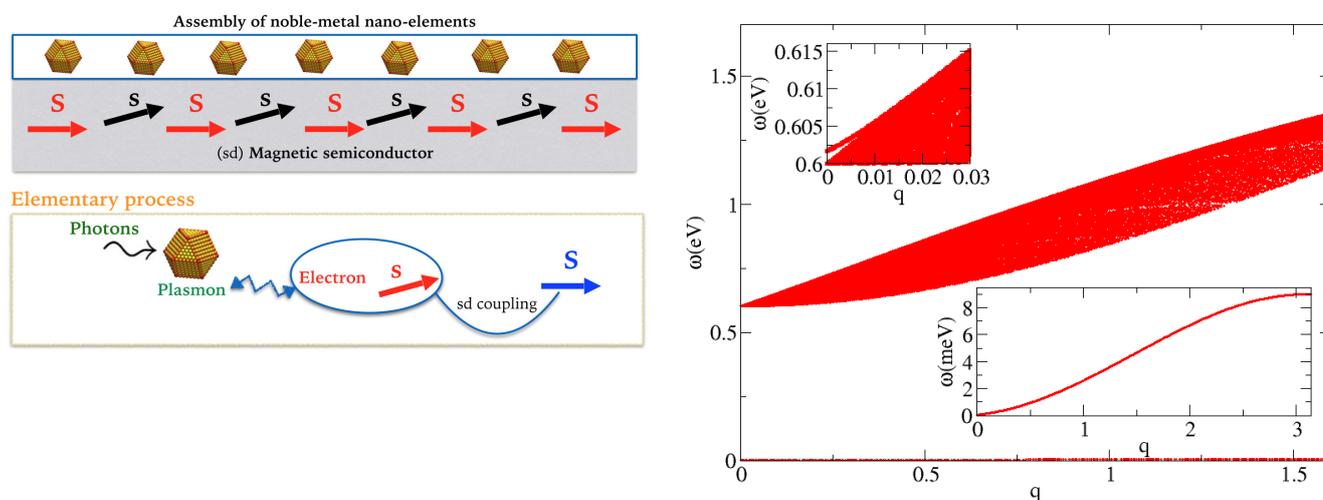


Figure 8 : Gauche : schéma du modèle sd et du couplage magnéto-plasmonique. Droite : Spectre d'excitation pour Eu<sub>1-x</sub>GdxO

Comme nous l'avons vu à travers les paragraphes ci-dessus, une synergie se dégage grâce à des développements utiles aux trois thèmes étudiés. Cela se traduit en premier lieu par les développements expérimentaux portés par l'équipe : pour chaque problème, nous cherchons à avoir une compréhension de du phénomène physique étudié en ayant une approche alliant théorie et confirmation par l'expérience. C'est pourquoi il nous a paru important de pouvoir, dans une certaine mesure, synthétiser des échantillons et les mesurer afin d'obtenir leurs caractéristiques magnétiques et optiques. Outre ce support expérimental transverse aux trois thèmes de recherche de S2N-POEM, pour être plus explicite, nous pouvons mentionner deux exemples montrant que les thèmes se nourrissent mutuellement.

Le couplage des équations de Maxwell aux équations de Landau-Lifschitz utile à la magnéto-plasmonique se fait en parallèle des

approches numériques alliant équation de Maxwell et méthodes de chimie quantique pour la photocatalyse. Dans les deux cas, les équations de Maxwell décrivent les propriétés mésoscopiques alors que, soit Landau-Lifschitz, soit la chimie quantique, s'intéressent à l'échelle atomique. Deux échelles distinctes sont à concilier, avec les mêmes questionnements pour les calculs numériques et le développement des codes associés.

Il en va de même pour l'étude des interactions dipolaires à longue-portée : cette thématique apparaît essentielle dans des applications comme l'hyperthermie magnétique, mais elle est également prégnante en plasmonique. En effet, les théories du type « milieux effectifs » telles que Maxwell-Garnett ne sont pas toujours à même d'apporter une bonne description des phénomènes optiques au sein d'une assemblée de nanoparticules métalliques. Nous avons là aussi affaire à des phénomènes d'interactions qui doivent être traités de façon similaire.



# Présentation de l'équipe

Responsable : L. Thomas (PR UPVD)

Permanents : F. Massines (DR CNRS), A. Dollet (DR CNRS), F. Teyssandier (DR CNRS, -04/19), M.A. Courty (DR CNRS), A. Soum-Glaude (IR CNRS 50% PPCM/50% TRECS), K. Djessas (PR UPVD), A. Vossier (CR CNRS), S. Grillo (MCF UPVD), A. Perona (MCF UPVD), S. Quoizola (MCF UPVD), J.M. Martinez (MCF UPVD).

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : K. Medjnoun (Co-Tutelle U.Tizi-Ouzou Algérie - 07/09/2015), R. Bazinette (PPCM - U.Pau - 03/05/2016), A. Sagna (Co-Tutelle U.Dakar Sénégal - 03/12/2016), F. Khaled (U.Batna Algérie - 12/02/2017), S. Hamrit (Co-Tutelle U.Jijel Algérie - 13/02/2017), B. Plujat (UPVD 24/02/17), A. Rosset (PPCM/SHPE - UPVD - 04/05/2017), P. Brunet (U.Québec - 17/07/2017), L. Di Giacomo (UPVD - 17/11/2017), A. Grosjean (UPVD - 08/03/2018), M. Belaqziz (Co-Tutelle U.Cadi Ayyad Marrakech Maroc - 16/04/2018), J. Zeitouny (UPVD - 14/12/2018), A. Mouhoub (U.Sétif, Algérie - 29/02/19), S. Lahlali (U.Cadi Ayyad, Marrakech Maroc - 25/04/19). (2) thèses en cours : D. Ziyati (UPVD 10/18-), A. Carling-Plaza (TRECS/PPCM UPVD 2018-), D. Ngoue (UPVD 10/17-), A. Lemaire (PPCM/COSMIC UPVD 10/16-), R. Magnan (10/16-U.Montréal), N. Milaniak (09/16-U.Laval-Québec).

Post doctorant : J.F. Lelièvre (09/15-02/18)

Chercheuse invitée : K. Medjnoun (convention d'accueil MEN-CNRS 09/2017- 08/2020)

ATER : K. Medjnoun (09/15-08/17), B. Plujat (09/16-08/18)

Mots clés

Photovoltaïque/CPV, CSP, nanocomposites, couches minces, plasma

Références

1, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 26, 28, 29, 34, 35, 40, 44, 47, 65, 82, 86, 88, 89, 90, 93, 102, 103, 110, 114, 118, 120, 123, 124, 125, 128, 131, 134, 139, 145, 150, 157, 164, 167, 168, 170, 171, 188, 194, 195, 197, 202, 205, 207, 211, 214, 223, 235, 236, 249, 251, 254, 255, 260, 263, 275, 276, 284, 292, 293, 294, 295, 297, 298, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 321, 322, 323, 325, 326, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 343, 344, 352, 353, 355, 358, 362, 363, 365, 366, 367, 375, 384, 385, 386, 387, 395, 396, 397, 398, 404, 413, 418, 419, 423, 428, 432, 435, 436, 437, 450, 453, 454, 459, 464, 465, 475, 476, 487, 489, 490, 493, 500, 501, 503, 504, 545, 546, 547, 564, 567, 568, 570, 572, 573, 574, 577, 578, 598, 608, 620, 629, 632, 637, 638, 641, 642, 643, 644, 676, 677, 688, 689, 694, 696, 705

### THÈMES

1. Cellules photovoltaïques pour forte concentration solaire (CPV)

2. Couches minces nano/micro-structurées pour cellules solaires PV à base CIGS et CZTS

3. Couches minces pour la conversion de l'énergie solaire: procédés plasma, croissance, design et optimisation

4. Matériaux nano-composites: synthèse plasma (de laboratoire et naturels), caractérisations croisées, modélisation

### COLLABORATIONS

Collaborations nationales

LAPLACE (Toulouse), ICCF (Clermont-Ferrand), IMN (Nantes), IJL (Nancy),

CEMHTI (Orléans), IEM (Montpellier), SIAME (Pau), IES (Montpellier), INSA (Toulouse), LabHC (St Etienne), Mines St Etienne, LAAS (Toulouse), L2C (Montpellier), ICSM-CEA (Marcoule)

Collaborations internationales

U-Montréal/U-Laval (Canada), U-Tizi-Ouzou/U-Batna/U.Djilel/U.Sétif (Algérie), U-Cheikh Anta Diop Dakar (Sénégal), U-Cadi Ayyad Marrakech (Maroc), U-Gabès (Tunisie), Fraunhofer ISE (Freiburg-Allemagne), U-Ben Gourion (Israël), U-Leida (Espagne)

### CONTRATS

Projet Européen Marie Curie RAPID (avec Fujifilm, TNO, SEMCO, CPI,

Plasmawerk, BOSCH, Oxford instrument, Tantec, InnoPhysics, Plasmaclean PCL, Picosun : 2013-2017, partenaire) ; ANR (PRC) HD-Plasm-A-SinOCH (avec ICCF/IJL/IMN: 2013-2017, coordinateur) ; ANR (PRCE) ASTORIX (avec HEF: 2014-2018 , partenaire) ; ANR (PRCE) NANOPLAST (avec ICCF/IMN/CEMHTI/HEF: 2019-2023, coordinateur) ; ADEME Solar Eranet APPI (avec Solar Capture Technologies limited, Schmid, Nines Photovoltaics, Solvay : 2015-2018 , partenaire) ; Région Occitanie PLASMECO (avec LAPLACE/IEM/HEF/TESCAN : 2018-2021, co-porteur/partenaire) ; Contrat d'accompagnement CIFRE PROMES/Helioprocess, 2014-2016, coordinateur.

• en bref •



## • Rapport Scientifique •

### Introduction

#### Contexte

Les matériaux innovants, en particulier déposés en couches minces, sont clés pour la conversion de l'énergie solaire. On les retrouve dans les cellules photovoltaïques ainsi que sur la surface des récepteurs des centrales thermodynamiques. Ils doivent être efficaces sous différentes conditions d'usage, que ce soit sous forte concentration solaire ou non, à haute température, sous différentes atmosphères. Ces matériaux doivent souvent être multifonctionnels (propriétés électriques, thermomécaniques, optiques, thermiques) et présenter une forte durabilité pour une utilisation sur le long terme (20 à 30 ans). Complexes, leurs caractérisations (morphologie, physico-chimie) associe des compétences variées pour maîtriser leurs procédés de synthèse, par voie plasma en particulier (en laboratoire ou situations naturelles). Ils sont insérés dans des structures fonctionnelles qui doivent être prédites avant élaboration.

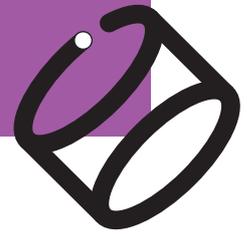
#### Objectifs scientifiques

C'est dans une démarche, du fondamental au transfert, alliant modélisation/génie des procédés d'élaboration/ caractérisations des matériaux/propriétés que se situent les activités de l'équipe "Photovoltaïque, Plasmas, Couches Minces" (PPCM). Elle mène des recherches sur :

- i) Le design et la modélisation de matériaux et structures pour la conversion photovoltaïque (sous concentration [CPV] ou sans concentration [PV], du matériau à la cellule), et thermique de l'énergie solaire (revêtements pour récepteurs),
- ii) Les procédés plasma (dépôt chimique: PACVD/dépôt physique: PVD) basse pression et

pression atmosphérique, iii) L'élaboration de couches minces multifonctionnelles, micro- et nano-structurées, iv) Les caractérisations croisées de matériaux micro- et nano-structurés (propriétés chimiques, structurales, optiques et thermo-optiques, mécaniques, électriques).

PPCM est une équipe bi-localisée entre les sites de Perpignan et d'Odeillo. Ces activités couvrent un large domaine de compétences. L'ensemble des travaux de l'équipe nécessite l'emploi de moyens, communs du laboratoire, mais aussi qui lui sont propres. Ainsi, on y développe par exemple des moyens permettant de caractériser des cellules PV sous fortes concentration (>1000 soleils), des dispositifs liés au vieillissement sous conditions extrêmes (four de recuits sous atmosphères variées), des expérimentations adaptées sur le dispositif commun SAAF [Solar Accelerated Facility]. PPCM étudie (diagnostics et modélisations) et développe ses propres sources et réacteurs de dépôt (PACVD/PVD/CSVT), pour la réalisation de couches minces micro- et nano-structurées, à la pression atmosphérique et basse pression. L'équipe dispose ainsi de nombreux dispositifs d'élaboration de matériaux en couches minces (10 réacteurs), majoritairement assistés par plasma munis de moyens de diagnostics (optiques, électriques). Elle met en œuvre ses différents moyens de caractérisation de propriétés des matériaux qu'elle élabore (FTIR, banc de mesures de durée de vie des porteurs photogénérés, fours de recuits à atmosphère contrôlée, en interne, et tribomètres/nanoindenteur/AFM multimodes, ces derniers étant aussi intégrés à la plateforme PCM de PROMES).



## 1. Cellules photovoltaïques pour forte concentration solaire

### 1.1 Systèmes hybrides PV/CSP

Le développement de systèmes hybrides photovoltaïques/thermiques à haute température suscite un engouement croissant dans la communauté solaire, puisque de tels systèmes permettraient de bénéficier simultanément, 1) du faible coût et de l'efficacité de conversion élevée des systèmes PV, 2) de la capacité de stockage thermique, et donc de la possibilité de produire de l'électricité tout au long de la journée. Le couplage de ces deux stratégies soulève de nombreux verrous scientifiques et technologiques, les conditions opératoires des systèmes thermiques et PV étant généralement très différentes. La détermination des performances de tels systèmes sur une large gamme de facteurs de concentration solaire et de températures est l'un des enjeux prioritaires pour mieux appréhender le fonctionnement des systèmes hybrides PV/CSP. Une des approches hybride envisagée implique l'utilisation de cellules photovoltaïques fonctionnant à des niveaux de température très élevés (plusieurs centaines de degrés). Le comportement électrique de cellules PV dans des conditions opératoires aussi extrêmes demeurant à ce jour largement méconnu, les travaux réalisés dans le cadre de cet axe de recherche visent notamment à mieux comprendre l'effet des très hautes températures sur les performances des cellules. Un premier volet de nos travaux a été dédié à la modélisation des principales approches hybrides PV/CSP avec pour principal objectif de déterminer leurs performances relatives, ainsi que la fraction d'électricité délivrée par chacun des deux convertisseurs (thèses J. Zeitouny 2015-2018) (Figure1)

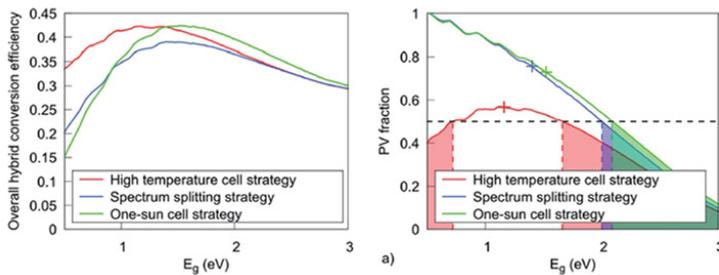


Figure 1: Rendement de conversion (gauche) et fraction PV (droite) des 3 principales stratégies hybrides PV/CSP : approche haute-température (courbe rouge), approche 1 soleil (courbe verte), et division spectrale (courbe bleue)

### 1.2 Performances de cellules solaires multi-jonctions en condition réelles d'utilisation

L'amélioration des performances des systèmes photovoltaïques à concentration passe nécessairement par le développement de technologies de cellules solaires à concentration très efficaces. Aujourd'hui, les cellules les plus performantes atteignent des rendements de conversion approchant 50% à des niveaux de concentration du flux solaire de plusieurs centaines de soleils. Le développement de cellules CPV toujours plus performantes à des niveaux de concentration solaire toujours plus élevés soulève de nombreuses questions, concernant d'une part l'optimisation des architectures de cellules à haut rendement, et d'autre part la capacité de ces mêmes cellules à fonctionner efficacement en conditions opératoire réelles (c'est-à-dire dans des conditions pouvant différer notablement des conditions de référence par rapport auxquelles ces mêmes cellules sont généralement optimisées et testées). Un volet important de nos travaux est consacré à ces deux problématiques. Dans cet objectif, nous avons développé un modèle de cellule solaire que nous avons adapté afin de pouvoir quantifier l'influence d'un certain nombre de mécanismes limitant (pertes résistives, distribution spectrale de la lumière absorbée, recombinaisons non-radiatives...). Ce modèle a été exploité afin 1) de mieux comprendre l'influence des principaux facteurs limitant sur les performances des cellules solaires à concentration 2) de quantifier l'influence de la distribution spectrale de la lumière (susceptible de varier sensiblement en conditions réelles d'opération) et d'adapter l'architecture des cellules solaires en conséquence 3) d'optimiser la structure des cellules solaires aux très fortes concentrations du flux solaire (thèse J. Zeitouny 2015-2018). (Figure2)

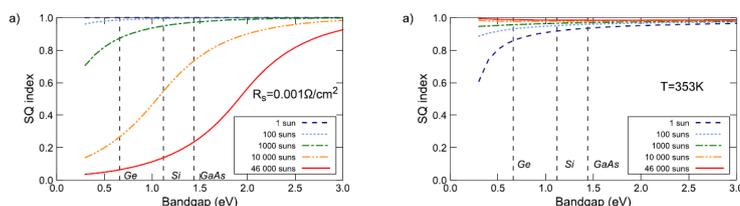


Figure 2: Influence des pertes résistives (gauche) et de la température de la cellule (droite) sur la capacité d'une cellule PV à s'approcher de sa propre limite théorique (matérialisée par l'indice de SQ)

### 1.3 OCVD pour le design de cellules photovoltaïques sous concentration solaire (CPV)

La mesure de durées de vie de porteurs de charges minoritaires est essentielle à l'optimisation du design de composants optoélectroniques et donc de cellules photovoltaïques. Nous travaillons sur la mesure de durées de vie de porteurs minoritaires dans les matériaux III/V dédiés à la conversion photovoltaïque sous concentration. La technique utilisée est l'OCVD (Open Circuit Voltage Decay). L'échantillon à caractériser doit être une jonction PN. Le principe repose sur l'arrêt soudain de la polarisation d'une jonction et l'enregistrement au cours du temps de la chute de tension  $V_1$  à ses bornes. (Figure 3) La décroissance  $V_1$  présente une partie linéaire dont l'inverse de la pente est proportionnel à la durée de vie ( $\tau$ ). L'intérêt de cette méthode est qu'elle est tout électrique et peut mesurer la durée de vie de porteurs minoritaires de n'importe quel type de matériau semi-conducteur pourvu qu'il soit sous la forme d'une jonction PN. Il peut être délicat d'obtenir une décroissance linéaire franche pour extraire convenablement la durée de vie suivant le design de la jonction et les caractéristiques du circuit de mesure. L'outil logiciel TCAD synopsis est donc utilisé pour simuler le composant ainsi que le circuit de mesure OCVD. Il permet de définir les caractéristiques géométriques et structurales des échantillons (épaisseurs, dopage) ainsi que les éléments qui composent le circuit de mesure. Des jonctions silicium et GaAs ont été simulées, puis caractérisées sur ce banc. Des durées de vie de quelques nanosecondes ont été mesurées pour le GaAs. Les perspectives concernent la mesure de  $\tau$  sur des alliages III-Sb pour cellules multi-jonctions (A.Lemaire 2016-2019).

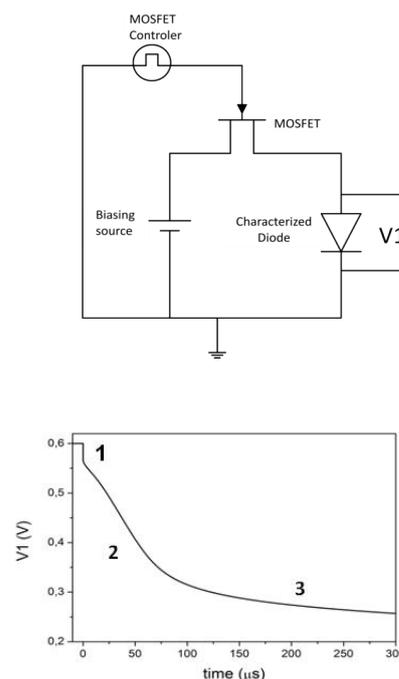


Figure 3: haut- Circuit de caractérisation OCVD, bas- Décroissance au cours du temps de la tension de diode  $V_1$ .

## 2. Couches minces nano/micro-structurées pour cellules solaires PV à base CIGS et CZTS

### 2.1 Nanoparticules et films de CIS et CIGS ultraminces nanostructurés

Le marché mondial du photovoltaïque est actuellement dominé par la technologie silicium cristallin. En effet, celle-ci affiche de très bons rendements de conversion, mais elle reste encore très coûteuse. Ce qui freine vraiment son développement est le coût élevé de l'énergie consommée par les procédés utilisés ainsi que la quantité importante de matière employée pour leur élaboration. Par conséquent, la réduction de la quantité de matière nécessaire à la fabrication des photopiles est l'une des solutions envisagée pour diminuer le coût du Wc produit. Les photopiles en couches ultraminces nanostructurées à base de composés  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  (CIGS) constituent en ce sens une filière attrayante. Pour répondre à cette exigence, nous avons réalisé et étudié des dépôts nanostructurés de CIS et CIGS ultraminces (~500 nm) par un procédé simple de pulvérisation cathodique

rf-magnétron. L'originalité de notre travail est l'obtention de ces films à partir d'une seule cible de pulvérisation constituée de nanopoudres de CIS ou CIGS synthétisées par voie chimique douce : la méthode solvothermale. Ce travail nous permis de mettre en évidence les effets des paramètres de synthèse sur les propriétés physico chimiques des nanoparticules de CIS et CIGS élaborées et de définir les mécanismes réactionnels mis en jeu. Les nanoparticules de CIGS obtenues cristallisent dans une structure chalcopyrite sans phases secondaires. Leurs coefficients d'absorption sont très élevés, de l'ordre de  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  dans la gamme du visible et proche-IR. Pour une composition x en Gallium égale à 0.3, les énergies de gap sont très proches de l'optimum requis pour la conversion PV (Figure 4). Ces travaux ont été réalisés avec la collaboration de l'INSA de Toulouse et l'Université de Gabès-Tunisie (Thèse en co-tutelle U.Gabès, A.Ben Marai, 2016).

	Dépôts de CIS			Dépôts de CSGS		
P (Watt)	60	8	10	60	80	100
$E_g$ (eV)	1.09	1.13	1.15	1.17	1.24	1.27

Figure 4: Valeurs de l'énergie du gap des couches ultraminces nanostructurées de CIS et de CIGS.



## 2.2 Dépôts microstructurés de CZTS et CTS

Dans un avenir proche, la rareté de certains éléments chimiques posera problème. En effet, les composés  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) et  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  (CTS) sont les candidats absorbants photosensibles en couche mince les plus prometteurs pour la conversion PV du fait que leurs éléments sont abondants et non toxiques et que leurs propriétés optoélectroniques sont remarquables. Ce travail se situe dans le contexte de la recherche de nouveaux matériaux photovoltaïques répondant aux exigences écologiques. Dans ce contexte, on s'est intéressé à la synthèse de ces composés par refroidissement lent programmé du bain fondu pour le CZTS massif et par méthode hydrothermale pour le CTS nanopoudre.

Ceci nous a conduit par la suite à la réalisation de dépôts (2 à 3  $\mu\text{m}$ ) de couches minces microstructurées de CZTS et CTS obtenues à partir d'un procédé d'élaboration simple utilisant le principe du transport chimique en phase vapeur. La technique choisie est originale et à faible coût, à savoir la CSVT (Close Spaced Vapor Transport) avec l'iode solide comme agent de transport. Pour réduire le nombre d'essais et prédire les conditions expérimentales favorables d'obtention des films minces de CZTS stœchiométriques et dépourvus de phases secondaires, nous avons effectué une simulation numérique sur la thermochimie du système basée sur la minimisation de l'énergie de GIBBS. Les résultats obtenus ont permis de définir une forte probabilité d'obtention de CZTS et CTS à faible température sans phase secondaire. En tenant compte des résultats de simulation, une série de dépôts a été réalisée en variant la température du substrat et la pression d'iode dans le réacteur CSVT. Les échantillons révèlent des propriétés optoélectroniques remarquables qui répondent parfaitement aux critères d'un absorbant destiné à la conversion PV (Figure 5). Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec l'U. Cheikh Anta Diop de Dakar et l'U. Cadi Ayyad, Marrakech (Thèses en Co-tutelles, A.Sagna 2016 et M.Belaqiz 2018).

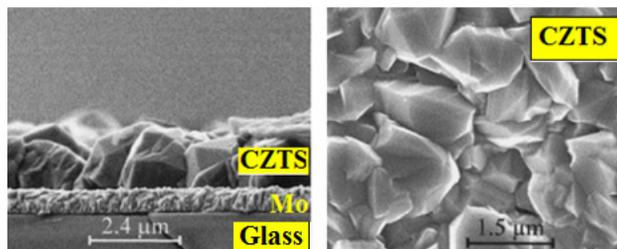


Figure 5: Gauche- coupe d'une couche mince CZTS déposée par CSVT sur Mo/verre, Droite- morphologie de surface.

## 2.3 Oxydes transparents conducteurs (OTC)

Habituellement, dans les dispositifs optoélectroniques, des couches minces d'oxyde transparent conducteur (OTC) sont déposées sur des substrats rigides de verre, mais ce dernier ne convient pas aux dispositifs optoélectroniques flexibles en raison de sa fragilité, de sa lourdeur et de son manque de souplesse. Par conséquent, l'utilisation de substrats organiques a beaucoup attiré l'attention de nombreux chercheurs afin de remédier aux inconvénients des substrats de verre et contribuer à la réduction des coûts des processus de production. Dans cette étude, nous avons utilisé le polyéthylène naphthalate (PEN) comme substrat souple pour y déposer l'OTC  $\text{ZnO}:\text{Al}$  (AZO), en films minces par  $\text{rf}$ -magnétron sputtering. Le substrat étant soumis à des températures inférieures à  $70^\circ\text{C}$ . Les cibles de pulvérisation sont constituées de nanopoudres AZO synthétisées par voie sol-gel à différentes concentrations de dopage. Les caractérisations menées révèlent que les nanopoudres obtenues présentent des grains quasi sphériques de bonne qualité cristalline. Elles cristallisent dans la structure wurtzite hexagonale sans phases secondaires. Les propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces AZO de 300 nm d'épaisseur ont été étudiées. Les meilleures cristallisations avec de faibles résistivités ont été observées sur des films préparés à 2 at.% de concentration en Al. D'autre part, l'effet de l'épaisseur des films sur les propriétés physico-chimiques a été examiné pour les couches minces AZO dopées Al à 2 at.%. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour une épaisseur optimale de 500 nm et les valeurs des grandeurs physiques obtenues répondent bien aux exigences des électrodes transparentes (Figure 6). Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'U. de M'Sila, Algérie et l'INSA de Toulouse (Thèse de S.Hamrit 2017).

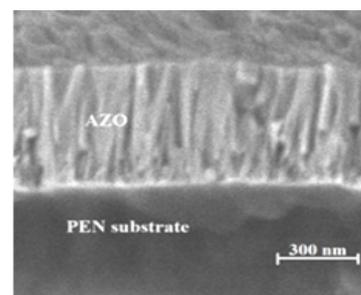


Figure 6: Image MEB en tranche d'une couche mince nanostructurée de  $\text{ZnO}:\text{Al}$  (2%), déposée sur substrat PEN par  $\text{rf}$  magnétron sputtering.

### 3. Couches minces pour la conversion de l'énergie solaire : procédés plasma, croissance, design et optimisation

#### 3.1 Couches antireflet et passivantes élaborées par AP-PECVD: dépôt en continu sur cellule PV en silicium cristallin

En 2007 a débuté la recherche de sources plasma et de procédés à pression atmosphérique pour le dépôt en continu de couches minces à propriétés optiques et électroniques contrôlées. Ces travaux se sont poursuivis dans le cadre d'un projet SolarEranet APPI « Atmospheric pressure processing for industrial solar cells » coordonné par le Fraunhofer ISE (Freiburg) avec l'objectif de déposer des couches SiNx antireflet et passivantes en face avant et arrière de cellules Si PERC. L'avantage de l'AP-PECVD développée à PROMES est la réduction des coûts par le traitement au défilé de grande surface avec décharge contrôlée par Barrière Diélectrique linéaire. Pour la première fois, le procédé a été utilisé pour réaliser des cellules solaires PERC à haut rendement (Figure 7). Le défi de déposer des couches de SiNx uniformes et denses par plasma à la pression atmosphérique a été relevé en optimisant la configuration du réacteur, la fréquence de la DBD et sa modulation.

Les résultats publiés dans Progress in Photovoltaics montrent que ce procédé convient pour traiter les faces avant et arrière des cellules. Des cellules ayant un rendement aussi élevé que la référence basse pression ont été obtenues. La durée de vie des porteurs minoritaires est supérieure à 1ms pour un  $J_{0e}$  de  $74 \pm 2$  fA/cm<sup>2</sup> (post-doc de J.F.Lelièvre). Le suivi de la décomposition de SiH<sub>4</sub> par IRTF (infrarouge) du gaz résolu spatialement (dispositif unique au monde installé en collaboration avec G. Laroche, U.Laval-Québec) a montré l'importance de la puissance plasma et de sa modulation pour homogénéiser le dépôt (Thèse de J.Vallade). La définition des conditions optimales s'est appuyée sur l'étude de la fréquence d'excitation sur la physique des DBD homogènes à pression atmosphérique. Un jeu d'alimentation électrique original fonctionnant entre 1kHz et 13,56 MHz a été réalisé avec le SIAME (Pau), dans le cadre du projet FUI Batir. L'étude dans cette gamme de fréquence montre que 3 régimes de DBD homogènes se succèdent: lumineuse, Townsend et radiofréquence lorsque les ions, puis les électrons commencent à être piégés dans le gaz par la fréquence d'oscillation, avec un régime singulier de forte puissance à la transition Townsend-RF. Ils se caractérisent par des puissances, des densités de métastables et des fonctions de distribution en énergie des électrons très différentes, offrant une large palette de conditions pour initier la chimie (Thèses de J.S.Boisvert dans He, R.Bazinette dans Ar/NH<sub>3</sub>).



Figure 7: Cellule PERC de 40x40 mm<sup>2</sup> avec la couche antireflet et passivante SiNx :H déposée par plasma à la pression atmosphérique. (p<sub>max</sub>=19,9%),

#### 3.2 Croissance de couches minces SiN(O)CH élaborées par PACVD micro-onde d'un organosilicié liquide

Les couches minces de SiCN(O):H sont réalisées industriellement par décomposition chimique en phase vapeur du silane, gaz pyrophorique qui induit de forts coûts de sécurité, en utilisant des plasma basse ou radiofréquence (35-50 kHz et 13,56 MHz) conduisant à de faibles vitesses de dépôt. Pour abaisser les coûts et augmenter les vitesses de dépôt, l'équipe PPCM travaille sur la décomposition du précurseur organosilicié liquide Tétraméthylsilane (TMS) par des procédés de dépôt basse pression et haute densité comme la PECVD micro-onde. La décomposition du TMS, dans un mélange gazeux Ar/NH<sub>3</sub>/TMS dissocié par plasma micro-onde, est étudiée en corrélant la physico-chimie de la décharge aux composition et morphologie des films obtenus pour faire varier de façon contrôlée et significative leurs propriétés fonctionnelles. La spectroscopie d'émission optique montre la diminution des espèces émissives NH et N<sub>2</sub> et l'augmentation des espèces carbonées vers les forts rapports TMS/NH<sub>3</sub>. L'évolution de l'espèce émissive CN est à comparer avec la composition des films déposés qui passent d'un caractère "nitrure" (faible taux de carbone) à un caractère "carbure" (faible taux d'azote) via des carbonitrides intermédiaires. L'analyse AFM de films réalisés à différents temps de dépôt montre une croissance de type Volmer-Weber (Figure 8). L'analyse chimique croisée de la surface (XPS) et du volume (FTIR) des couches minces montre, durant la croissance, la structuration thermique, du fait du chauffage du substrat lors du dépôt (400°C), des couches superficielles déposées à partir des espèces réactives du plasma au fur et à mesure qu'elles sont "enterrées" dans la couche en construction (thèse de B.Plujat 2018). Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR HD-Plasm-A-SiNOCH (PROMES/ICCF/IMN/IJL).

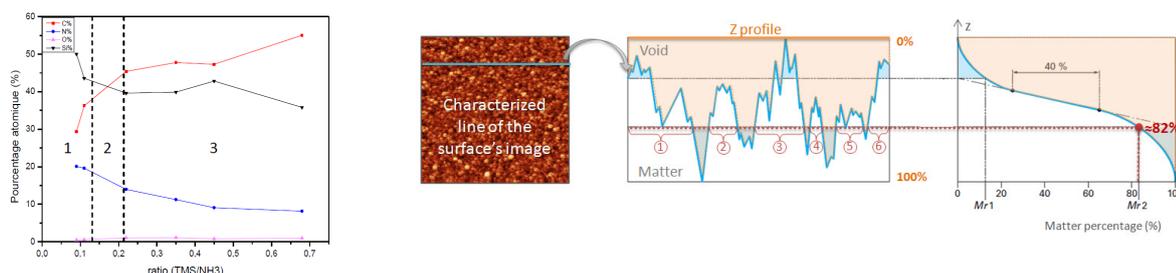


Figure 8: Effet du rapport des débits TMS/NH<sub>3</sub> injectés dans la décharge microonde sur la composition atomique des films a-SiCN:H et Mesures AFM et profils de matière obtenus



### 3.3 Design et élaboration de couches minces pour les récepteurs solaires du CSP

Le champ solaire représentant 50% des pertes de rendement des centrales CSP, les revêtements déposés sur les surfaces des capteurs sont clés (réfléchissants sur miroirs, antireflets sur fenêtres verre, absorbants sélectifs sur absorbeurs). Nos travaux visent à la modélisation et l'optimisation de chacun des revêtements afin d'identifier les moyens les plus pertinents d'améliorer l'efficacité thermo-optique de capteurs solaires

complets pour différents emplacements géographiques. Cela passe par 1) l'identification des limites de performance existantes; 2) l'identification de matériaux avancés pour augmenter l'énergie collectée; 3) l'utilisation de spectres solaires locaux pour optimiser les performances des revêtements; 4) l'adaptation des revêtements aux géométries des capteurs solaires; 5) l'utilisation de calculs thermodynamiques et d'exergie pour maximiser la part d'énergie convertible en travail mécanique. Pour répondre à cela un outil de modélisation/optimisation a été développé. Il est alimenté par un vaste éventail de données de propriétés des matériaux (littérature/mesures), une base de données de spectres solaires locaux calculés à l'aide de modèles atmosphériques. Nos travaux montrent qu'il est possible d'améliorer les revêtements solaires et ainsi augmenter les performances d'exemples réels de centrales (cascades miroirs/verres/absorbeurs, concentration solaire, température, lieux d'installation). Cette modélisation intégrée vise à proposer de nouvelles solutions de revêtement optimisées pour les champs solaires des futures centrales CSP (thèse A.Grosjean 2018). Nous développons des multicouches absorbantes sélectives, en alternant les techniques plasma de CVD micro-onde du Tétraméthylsilane et de PVD magnétron RF du tungstène. Le couplage entre spectroscopie d'émission optique et analyses des dépôts plasma a permis l'obtention d'une large gamme de propriétés optiques ( $n(\lambda)$ ,  $k(\lambda)$ ) de monocouches. Ces revêtements empilés en multibicouches  $(W/SiC:H)_n$ , optimisées par modélisation, présentent une absorption solaire jusqu'à 80% et des émissivités IR (550°C) faibles (jusqu'à 15%). Des rendements héliothermiques jusqu'à 70% pour applications en configurations Linéaire-Fresnel sont obtenus (Figure 9). Ces multicouches déposées sur métaux pour solaire (aciers, Inconel) ne présentent ni dégradation thermo-optiques, ni d'adhésion sur substrats après des cycles de recuits (24 h, sous air à 500°C) durant au moins 192 h cumulées. Ces multicouches supportent des déformations mécaniques de 1 à 2%. Ces solutions satisfont donc les conditions d'utilisation du CSP (thèse L.Di Giacomo 2017). Une étude de faisabilité industrielle est en cours. Ces travaux sont soutenus par l'ANR (projet ASTORIX: PROMES/HEF/LabHC/Mines St Etienne), le LABEX SOLSTICE et l'EQUIPEX SOCRATE).

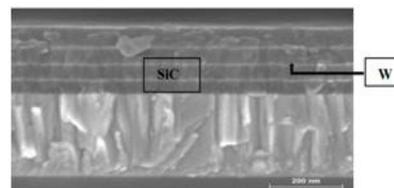
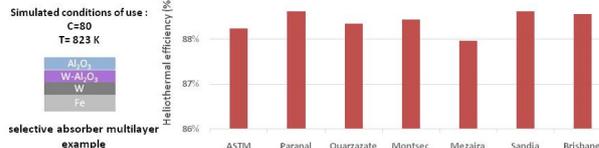


Figure 9 : haut - Exemples de rendements héliothermiques de multicouches absorbantes sélectives optimisées à l'aide du spectre de référence ASTM 1.5 et locaux. Milieu - Réacteur hybride PACVD/PVD pour couches solaires absorbantes à sélectivité spectrale. Bas - exemple multicouche sélective à base SiC:H (PACVD)/W (PVD)

## 4. Matériaux nanocomposites : synthèse plasma (de laboratoire et naturels), caractérisations croisées, modélisation

### 4.1 Procédés plasma à la pression atmosphérique pour la synthèse de nano-composites contrôlés

Déposer des couches minces nanocomposites est une alternative pertinente pour apporter plusieurs fonctionnalités à un matériau avec très peu de matière. La solution étudiée dans le cadre de l'ANR internationale DBDBD consiste à injecter dans une DBD des nanoparticules (NPs) et un précurseur de dépôt polymérisé par le plasma. A pression atmosphérique, ces précurseurs peuvent être injectés sous forme d'aérosol. La DBD fonctionnant dans une large plage de fréquence, ce paramètre a été utilisé pour contrôler la morphologie du dépôt. La croissance de la matrice est proportionnelle à la puissance de la décharge qui augmente avec la fréquence alors que le transport des NPs vers le substrat dépend fortement du champ électrique dès que la fréquence est inférieure à quelque kHz. En alternant, basse et haute fréquence avec une méthode simple (FSK : Frequency shift keying), la vitesse de croissance de la matrice polymère et la quantité de NPs de  $TiO_2$  incluse dans la couche ont été modulées conduisant à des couches structurées superhydrophobes ou superhydrophiles, ou à des couches denses et homogènes (Thèse de P. Brunet). L'agrégation des NPs est un verrou difficile à lever sans fonctionnaliser les NPs. Nous explorons la piste de la mise en vol de NPs compactées sous forme de cible, par un flux d'ions généré par une RF-DBD polarisée en basse fréquence (Figure 10). L'étude expérimentale couplée à la modélisation (collab. G.Hagelaar, LAPLACE), montre que lorsque l'amplification dans le gaz est suffisante, les ions extraits par la polarisation induisent une transition du mode  $\alpha$  au mode  $\gamma$ . Cette transition densifie les dépôts de silice et augmente la mise en vol des NPs (Thèses de R.Bazinette et R.Magnan).

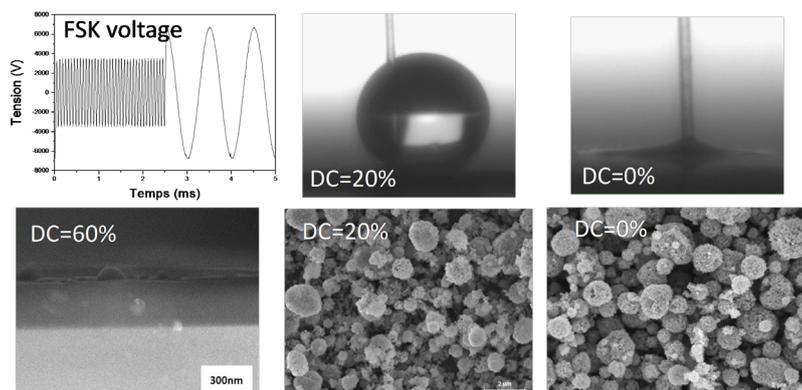


Figure 10: NPs TiO<sub>2</sub> et éthanol, précurseurs de film de NPs de TiO<sub>2</sub> dans une matrice polymère déposé par DBD en mode FSK alternant 1 et 15 kHz à différents rapports cycliques (DC). DC entre 40 et 60% : composite, DC=20% : agrégats de TiO<sub>2</sub> recouverts d'un polymère superhydrophobes, DC=0% (1kHz): agrégats de TiO<sub>2</sub> superhydrophile.

#### 4.2 Nano-composites élaborés en décharges électriques naturelles et de laboratoire

La connaissance des mécanismes de croissance des nanoparticules par les plasmas de laboratoire et de la synthèse de nanocomposites sous champ électrique permet des progrès majeurs dans la formation de nanocomposites polymères par assemblage d'aérosols ionisés à la suite d'un flash électrique dans l'atmosphère terrestre et au sol. Ces filaments, films et agglomérats de taille millimétrique, sont reproduits en laboratoire par divers modes de décharge (arcs, DBD, sous courants alternatifs ou continus, décharges pulsées) à l'aide de divers précurseurs (hydrocarbures, suspensions dans l'eau de nanoparticules chargées). La synthèse en laboratoire de ces filaments nanocomposites à partir d'hydrocarbures ultra purs permet d'avancer l'hypothèse d'un déploiement par décharges plasmas de nanoboules en "papier froissé", corrélatif d'une libération d'impuretés métalliques ionisées. La nanoarchitecture 3D, empilement de nanofeuillets enroulés, fournit une signature d'une formation par attachement de nanofeuillets 2D de type graphène sous champ électrique en milieu liquide (Figure 11). L'hyper-réticulation de la matrice hydrocarbonée assurée par ces nanobriques serait la clé de leurs propriétés remarquables : super-hydrophobicité, biorésistance, résistance thermique et mécanique, conductivité élevée, extrême longévité (milliers à millions d'année). Les nanocomposites polymères produits par décharges plasma constituent des marqueurs de l'impact de l'ionisation de l'atmosphère sur les ressources environnementales et le monde vivant.

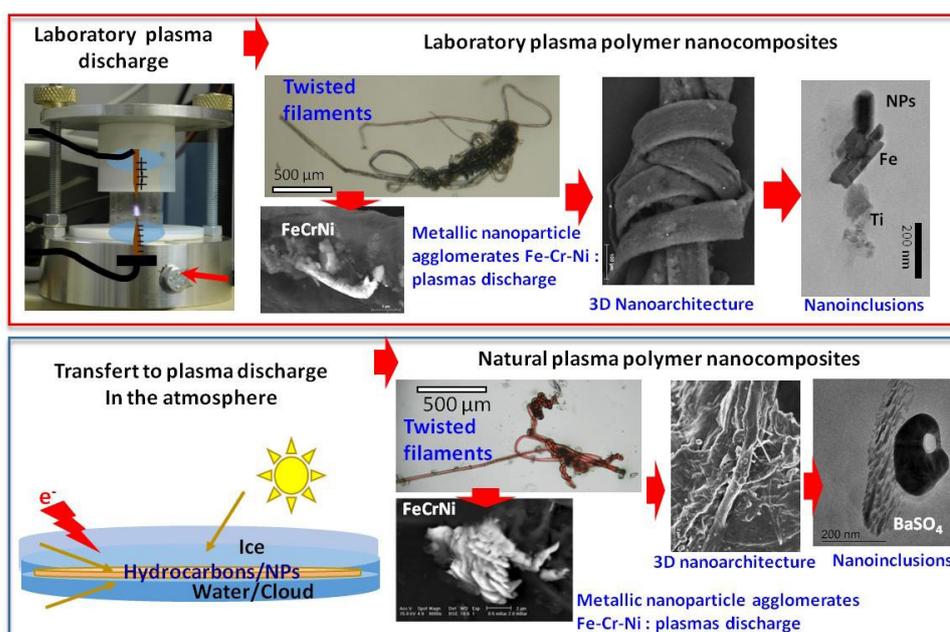


Figure 11: Comparaison entre des nanocomposites polymères obtenus en décharge de laboratoire dans des liquides et des échantillons issus de l'atmosphère terrestre et recueillis sur le sol



### 4.3 Prédiction des performances thermo-optiques de couches minces composites à sélectivité spectrale pour le CSP

Les centrales solaires à concentration combinées à un cycle thermodynamique nécessitent des matériaux de grande efficacité de conversion. La surface des absorbeurs doit présenter une forte absorptivité solaire (UV-Visible-proche IR) et une faible émissivité infrarouge pour limiter les pertes radiatives, donc maximiser la conversion de l'énergie solaire. Nous développons des céramiques Si(NO)C:H et cermets (composites matrice céramique/inclusions métalliques nanométriques) par plasma (PACVD/PVD). Avant élaboration, leurs performances optiques sont prédites par simulations optiques couplées à des algorithmes d'optimisation de type génétique, afin de définir les designs de couches pertinents (épaisseurs, indices optiques, taux d'inclusions métalliques pour les composites, adaptation aux spectres solaires locaux). Les designs des composites sont définis à l'aide de modèles de milieux effectifs, basés sur la connaissance des propriétés optiques de leurs matériaux constitutifs (thèses de L. Di Giacomo [-2017] et D. Ngué [2018-]). Les simulations prévoient que les monocouches composites SiC:H-métal présentent des rendements de conversion de l'énergie solaire supérieurs aux multicouches SiC:H/métal (Figure 12). Ces travaux sont soutenus par l'ANR (projets ASTORIX PROMES/HEF/LabHC/Mines St-Etienne et NANOPLAST PROMES/ICCF/IMN/CEMHTI/IREIS-HEF), le LABEX SOLSTICE et l'EQUIPEX SOCRATE.

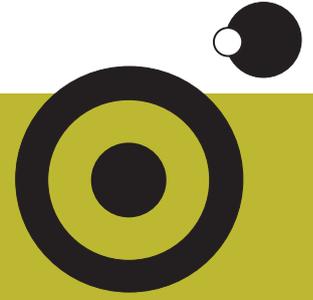
Performance optique	Multicouche W/SiC:H/W/SiC:H (mesuré)	Monocouche composite SiC:H-W (simulé)
Absorptivité solaire	83,2%	81,2%
Émissivité (550°C)	25,7%	10,2%
Rendement héliothermique	62,2%	72,9%

Figure 12: Comparaison des performances solaires de multicouches et composites plasma à base W et SiC:H

Afin de développer ces différents thèmes, PPCM doit désormais approfondir ses compétences dans le but de :

- Concevoir et tester des cellules PV haut rendement, et comprendre l'effet des hautes températures pour développer en particulier des systèmes hybrides PV/CSP efficaces et pilotables.
- Concevoir et élaborer des revêtements pour récepteurs CSP associant à la fois haut rendement optique et durabilité élevée, en explorant le potentiel des couches minces nano-composites élaborées par plasma.
- Maîtriser croissance et transport de nanoparticules en plasma (PACVD et PVD), à pression atmosphérique et basse pression, pour réaliser des architectures couches minces multifonctionnelles à vocations solaires (PV, CSP, couplages PV/CSP).
- Développer des plasma multi sources/multifréquences pour un meilleur contrôle des procédés de dépôt jusqu'au transfert industriel.
- Optimiser les protocoles d'analyse de matériaux nanostructurés pour corrélérer leurs caractères (physico-chimie, structuration) à leurs propriétés élémentaires (optique, électriques...), fonctionnelles (rendement de conversion, durabilité...) et remonter aux sources de leur croissance (sources naturelles, procédés de laboratoire).





## Présentation de l'équipe

Responsables : M. Balat-Pichelin (DR1 CNRS) jusqu'au 31 décembre 2016, L. Charpentier (CR CNRS) à partir du 1er janvier 2017

Permanents : L. Charpentier (CR CNRS), M. Balat-Pichelin (DR1 CNRS), S. Abanades (DR2 CNRS), S. Rodat (CR CNRS)

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : Q. Bellouard (10/11/2017), L. André (29/11/2017), C. Piriou (7/11/2018), L. Barka (30/11/2018), S. Chuayboon (29/11/2019), J. Colas (13/12/2019); (2) thèses en cours : A. Haeussler (début 10/2017), J. Jouannaux (début 10/2017), H. Boujjat (début 11/2017), C. Pellegrini (début 10/2018), N. Perron (début 10/2018)

Post doctorant : J. Puig (12/2014-10/2019)

Mots clés

Céramiques, Hautes Températures, Thermochimie, Hydrogène, Valorisation du CO<sub>2</sub>

Références

2, 9, 21, 22, 25, 39, 52, 53, 58, 59, 67, 70, 71, 72, 73, 79, 80, 84, 85, 96, 97, 112, 132, 144, 156, 159, 160, 161, 165, 174, 175, 176, 189, 193, 200, 203, 206, 215, 220, 221, 222, 224, 225, 228, 230, 232, 233, 234, 242, 245, 256, 257, 259, 262, 265, 282, 285, 286, 287, 289, 290, 348, 349, 356, 364, 368, 369, 370, 371, 374, 381, 409, 410, 411, 424, 430, 433, 434, 446, 456, 462, 463, 466, 467, 468, 472, 473, 474, 486, 492, 495, 496, 502, 561, 571, 576, 580, 581, 582, 584, 585, 600, 601, 616, 617, 621, 630, 631, 648, 649, 658, 659, 671, 672, 673, 674, 675, 685, 691, 695, 698, 699, 700, 702, 703, 707, 708, 709, 713, 714, 716, 717, 718, 722, 723, 724.

### THÈMES

1. Réactivité chimique de matériaux à très haute température
2. Mesure des propriétés thermo-radiatives de matériaux à haute température
3. Production de carburants solides par énergie solaire concentrée
4. Production de combustibles de synthèse par thermochimie solaire

### COLLABORATIONS

#### Collaborations nationales

CEA-INES (Le Bourget-du-lac), IEM (Montpellier), IRCER (Limoges), SIMaP (Grenoble), Sil'tronix ST (Grenoble), ONERA (Toulouse), CNES (Toulouse), CEMHTI (Orléans), CEA (Cadarache), Institut Chimie (Clermont-Ferrand), ICARE (Orléans) et GRE (Mulhouse)

#### Collaborations internationales

Chine : Lab of Energy Chemical Engineering Department, University of Technology, (Hangzhou)  
 Emirats Arabes Unis : Masdar Institute of Science & Technology (Abu Dhabi)  
 Italie : CIRA (Caserte)  
 Japon : IHI Corporation (Tokyo)  
 Mexique : IER-UNAM (Mexico)  
 Portugal : LNEG (Lisbonne)  
 Roumanie : University of Brasov (Brasov)  
 Slovénie : Plasma laboratory, Josef Stefan Institute (Ljubljana)  
 Etats-Unis : University of Michigan (Ann Arbor)

#### CONTRATS

POLYPHEM (H2020, obtenu en 2018, 48 mois, partenaire);  
 2MAC-CSP (ANR, obtenu en 2016, 48

mois, coordinateur);  
 SunFuel (ANR, obtenu en 2016, 48 mois, coordinateur);  
 STELLAR (ANR, obtenu en 2019, 42 mois, partenaire);  
 CNES R&T (Industriel, obtenu en 2014, 36 mois, coordinateur);  
 PSA Peugeot-Citroën Automobiles (Industriel, obtenu en 2016, 12 mois, coordinateur);  
 CNES (Industriel, obtenu en 2017, 12 mois, coordinateur);  
 CNES R&T (Industriel, obtenu en 2017, 22 mois, coordinateur);  
 SATT AxLR (Industriel, obtenu en 2018, 17 mois, coordinateur);  
 IHI Corporation (Industriel, obtenu en 2011-2014, renouvelé ensuite en 2018 et en 2019 pour 12 mois supplémentaires à chaque fois, coordinateur)

- en bref -



## • Rapport Scientifique •

# Introduction

### Contexte

L'équipe Matériaux Hautes Températures et Carburants Solaires est la seule équipe de recherche dont le personnel est uniquement basé sur le site du four solaire d'Odeillo. Sur la période concernée par ce rapport, l'équipe a connu deux responsables : Marianne Balat-Pichelin (DR1 CNRS) a dirigé l'équipe jusqu'au 31 décembre 2016 puis, suite à sa nomination comme directrice adjointe du laboratoire PROMES, Ludovic Charpentier (CR CNRS) a pris la responsabilité de l'équipe au 1er janvier 2017. 11 doctorants et 1 post-doctorant ont travaillé au sein de l'équipe sur la période concernée. L'effectif permanent est passé de 3 à 4 chercheurs suite à l'arrivée de Sylvain Rodat le 1er novembre 2019 (recruté par le concours CR 2019).

### Objectifs scientifiques

L'équipe « Matériaux Hautes Températures et Carburants Solaires » développe des recherches autour de quatre thématiques : la réactivité chimique et la mesure des propriétés thermoradiatives de matériaux à très haute température sous différents environnements (plasma, standard, ultravide...) ; la métallurgie solaire via le recyclage de matériaux micro- ou nanostructurés pour la propulsion (transport terrestre) et le stockage d'énergie et la production de nouveaux carburants solaires (H<sub>2</sub>, syngas) par conversion thermochimique de méthane ou de biomasse, la synthèse

d'hydrogène par cycles thermochimiques de dissociation de l'eau et la valorisation du CO<sub>2</sub> en vecteurs d'énergie.

L'ensemble de ces thématiques utilise les fours solaires à concentration d'Odeillo qui permettent de simuler des conditions extrêmes de température sous atmosphère contrôlée, ce qui correspond aux domaines de l'espace et de l'énergie. Les recherches permettent ainsi de qualifier ces matériaux et dans le cas des combustibles de synthèse, de développer des réacteurs solaires à haute température adaptés aux différents procédés thermochimiques étudiés.

Les applications visées concernent les matériaux des futurs récepteurs solaires de centrale solaire à tour et les matériaux de protection (boucliers thermiques) de sondes solaires (Parker Solar Probe, NASA) et de véhicules spatiaux réutilisables (IXV, ESA) ou encore l'étude des débris spatiaux dans le cadre de la LOS (Loi française sur les Opérations Spatiales). Dans le domaine de la thermochimie solaire, les applications sont la production de carburants solides métalliques, la valorisation de ressources carbonées (méthane, biomasse, déchets), le stockage thermochimique à haute température, et la conversion de l'eau et du CO<sub>2</sub> en carburants solaires (H<sub>2</sub> et gaz de synthèse), précurseurs essentiels pour la synthèse de différents combustibles dérivés.



## 1. Réactivité chimique de matériaux à très haute température

### 1.1 Matériaux fonctionnels haute température

Le rendement d'une centrale solaire à concentration dépend essentiellement du comportement à haute température du récepteur chargé de transmettre la chaleur produite par absorption du rayonnement solaire concentré au fluide caloporteur. Pour les systèmes utilisant l'air comme gaz caloporteur, ce gaz ne peut pas sortir du récepteur à plus de 1100 K à cause de la dégradation des propriétés thermiques des matériaux actuellement utilisés (alliages métalliques, SiC) en conditions extrêmes (haute température, atmosphère oxydante). Les travaux menés au sein de l'équipe MHTCS ont pour objectif de contribuer au développement de nouveaux matériaux (nouvelles compositions de céramiques UHTC, développement de revêtements protecteurs sur alliage métallique) d'une part, à l'étude expérimentale de l'évolution des propriétés radiatives d'un matériau en environnement extrême d'autre part. Ces études sont menées sur les réacteurs solaires REHPTS (Réacteur Hautes Pression et Température Solaire, fig.1) et MESOX (Moyen d'Essai Solaire d'Oxydation).

#### 1.1.1 Qualification de nouvelles céramiques UHTC

Les matériaux UHTC qui ont comme caractéristique principale un point de fusion élevé (> 3500 K) ont connu un regain d'intérêt ces dernières années comme en témoigne l'accroissement important du nombre de publications concernant les 4 céramiques les plus étudiées : ZrC, ZrB<sub>2</sub>, HfC et HfB<sub>2</sub>. En collaboration avec le laboratoire IRCER (UMR CNRS/Université de Limoges), il a été possible d'étudier dans le cadre de la thèse

de C. Piriou l'impact du choix de la teneur en SiC d'un matériau à base ZrB<sub>2</sub> ou HfB<sub>2</sub> sur sa tenue à l'oxydation sur les réacteurs REHPTS et MESOX (plasma d'air). D'autres matériaux UHTC sont développés dans le cadre de la thèse de C. Pellegrini afin de résister à très haute température sous plasma d'air pour des applications aux vols hypersoniques, en utilisant le réacteur MESOX.

#### 1.1.2 Revêtements avancés multicouches multifonctionnels pour les centrales solaires à concentration

Cette étude est menée depuis octobre 2016 dans le cadre projet ANR 2MAC-CSP (Multilayer Multifunctional Advanced Coatings for Concentrated Solar Power plants), en partenariat avec le laboratoire SIMaP (UMR Université Grenoble Alpes/CNRS/Grenoble INP) et l'entreprise SIL'TRONIX ST (thèse J. Colas). La technique HTCVD (High Temperature Chemical Vapor Deposition) développé au SIMaP en partenariat avec SIL'TRONIX ST permet de revêtir des alliages haute température de dépôt AlN ou SiC/AlN. Ce travail consiste à vérifier si le revêtement permet de limiter l'oxydation du substrat et d'améliorer ses propriétés optiques, ce qui en ferait une solution technologique pour la conception de récepteurs solaires. La figure 2 montre par exemple que le revêtement d'AlN est bien moins protecteur (décollement du revêtement observé au bout de 3 cycles de 20 minutes d'oxydation à 1400 K) sur l'Inconel que sur l'alliage Kanthal APMT (maintien du revêtement et faible cinétique d'oxydation observée à 1400 K).



Figure 1 : REHPTS au foyer du four solaire de 6 kW

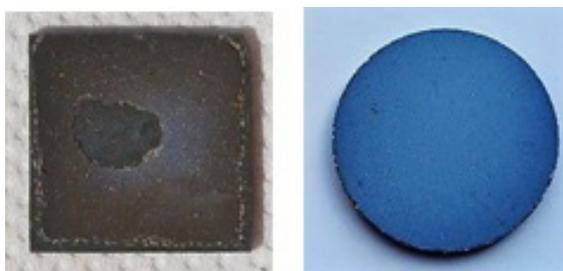


Figure 2 : Echantillon AlN/Inconel (à gauche) et AlN/Kanthal APMT (à droite) après 3 cycles d'oxydation à 1400 K

## 1.2 Matériaux pour l'espace

### 1.2.1 Matériaux de protection thermique

Dans le cadre de missions solaires telles que Parker Solar Probe (NASA) lancée le 12/08/2018, Solar Orbiter (ESA) dont le lancement est prévu en Février 2020, projet PHOIBOS (ESA), il est nécessaire de prévoir un bouclier thermique permettant de protéger les instruments embarqués de la haute température et/ou des photons issus des vents solaires, du rayonnement VUV... Pour cela, en collaboration avec le CNES, le réacteur MEDIASE - Moyen d'Essai et de Diagnostic en Ambiance Spatiale Extrême - placé au foyer du grand four solaire d'Odeillo, a été développé afin de simuler au mieux les différentes agressions que peut subir le matériau et ceci sous vide secondaire. Ce réacteur dispose de 2 configurations distinctes pour l'étude du comportement physico-chimique de matériaux à très haute température (2500 K max) et d'une autre permettant la mesure des propriétés thermo-radiatives. Différents matériaux céramiques en revêtement sur des composites C/C ou des composites C/C seuls ont été étudiés avec et sans bombardement ionique (protons de 1 à 5 keV), avec ou sans rayonnement VUV simulant la raie Lyman alpha de l'hydrogène de très forte intensité à proximité du soleil. Après l'étude du comportement physico-chimique de ces matériaux, des caractérisations micro-structurales par MEB, DRX, Raman, XPS, BRDF et profilométrie 3D sont effectuées ainsi que la mesure des propriétés thermo-radiatives dont le rapport absorptivité solaire/émissivité qui conditionne l'équilibre thermique du bouclier.

### 1.2.2 Débris spatiaux

L'application de la LOS (Loi sur les Opérations Spatiales) impose dès 2021 que tous les satellites lancés par la France n'aient plus de carburant en fin de mission (passivation) et qu'ils soient détruits en rentrant dans l'atmosphère terrestre afin de dégager l'orbite basse LEO actuellement encombrée de débris qui peuvent engendrer des collisions avec les satellites en activité et avec la station spatiale internationale (ISS).

Pour cela, en collaboration avec le CNES, des études sont menées sur les matériaux les plus difficiles à détruire que sont d'une part, les alliages métalliques tels que TA6V, Inconel 718, Invar 36 et les aciers 316L et 304L, et d'autre part les céramiques telles que SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> et Zerodur des optiques de miroir. Pour la certification du lancement du satellite, le code DEBRISK du CNES est appliqué. Ce code nécessite des données d'entrée à haute température et mesurées quand cela est possible sous plasma d'air telles que la chaleur et la cinétique d'oxydation, les propriétés thermophysiques et en particulier l'émissivité totale hémisphérique.

Dans ce cadre, des études d'oxydation sous plasma d'air ont été réalisées sur le moyen d'essai MESOX au foyer du four solaire de 6 kW et des lois d'oxydation en fonction de la température ou du temps ont été déterminées conduisant à la détermination d'énergies d'activation. Il est à noter que ces études d'oxydation sont réalisées dans des conditions très différentes de ce que l'on peut trouver généralement dans la littérature que ce soit au niveau des durées d'oxydation de 15 à 500 s max, que des températures très proches de la fusion... et en présence d'oxygène atomique (fig. 3) (thèse L. Barka).

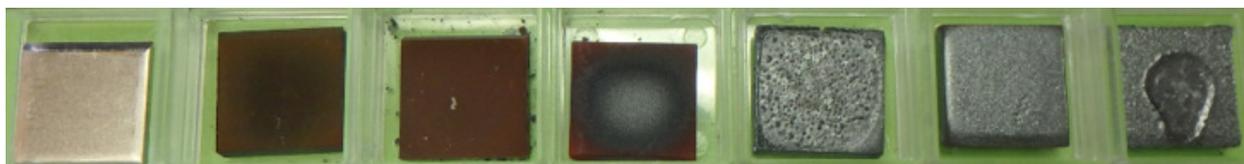


Figure 3 : Echantillons d'Invar 36 référence et oxydés en plasma d'air entre 1180 K et 1700 K (fusion)

## 2. Mesure des propriétés thermo-radiatives de matériaux à haute température

Cette thématique a pour objectif de mesurer les propriétés thermo-radiatives à très haute température sous atmosphère contrôlée (basse pression, vide secondaire, air, argon...) et de relier l'évolution de l'émissivité à celle de l'état de surface du matériau en fonction du changement de composition (lié par exemple à une oxydation), de morphologie (rugosité, texturation)... Pour ce faire, le réacteur MEDIASE dans sa seconde configuration est utilisé. Un radiomètre large bande ou un spectroradiomètre peut être utilisé afin de mesurer la luminance de l'échantillon porté à haute température. Un pyroréfectomètre développé au laboratoire permet la mesure de la température réelle et l'émissivité est obtenue par méthode directe.

L'oxydation de surface conduit à un changement d'émissivité qui peut être relié à l'épaisseur de la couche d'oxyde. La figure 4 présente un exemple dans le cas du SiC alpha fritté d'évolution de l'émissivité totale hémisphérique en fonction de l'épaisseur de la couche de silice formée sous air à différentes pressions et pour différentes températures ainsi que les photos MEB des états de surface des couches d'oxyde selon les conditions (P,T), ceux-ci étant à mettre en relation avec la position de la transition active/passive du SiC.

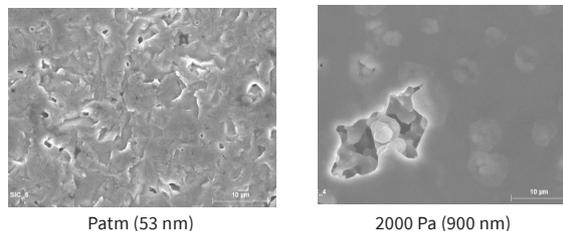
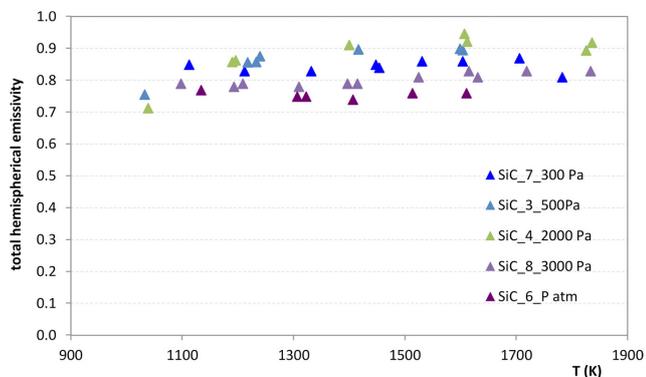


Figure 4 : Emissivité totale hémisphérique en fonction de la température pour du SiC alpha oxydé sous différentes pressions totales d'air (à gauche) et images MEB des surfaces de SiC oxydé à Patm et à 2000 Pa (épaisseur de la couche d'oxyde en nm) (à droite)

### 3. Production de carburants solides par énergie solaire concentrée

L'utilisation de nouveaux cycles thermochimiques basés sur des combustibles métalliques recyclables constitue une alternative énergétique durable face à l'emploi de ressources fossiles. Dans ce contexte, le développement de nouveaux procédés de transformation utilisant la voie solaire concentrée pour produire des métaux hautement énergétiques est envisagé. Ces études menées dans le cadre de l'ANR STELLAR visent à optimiser la conversion d'une énergie renouvelable intermittente sous la forme d'un matériau solide valorisé pouvant être stocké sans dégradation de ses performances. Les métaux produits constitueront de nouveaux vecteurs énergétiques dans les secteurs clés de l'énergie, du transport et de l'industrie. Les métaux visés doivent être abondants et avoir des densités énergétiques élevées. L'aluminium, le magnésium, le silicium ou le fer sont ainsi des candidats prometteurs avec des densités énergétiques (de 40 à 82 MJ/l) supérieures à celles générées par l'utilisation de nombreux combustibles.

Dans le secteur des transports, un procédé énergétique innovant de combustion de poudres métalliques finement divisées est étudié dans les 2 autres laboratoires partenaires (ICARE Orléans et GRE Mulhouse) afin de faire fonctionner des moteurs à combustion externe en utilisant l'oxygène de l'air en tant que comburant. Les oxydes formés lors de la combustion sont ensuite réduits en éléments métalliques en utilisant l'énergie solaire concentrée au laboratoire PROMES, formant un cycle fermé de « Combustion-Régénération ». Des expérimentations de carbo-réduction sous vide primaire et sous écoulement d'argon sont menées sur le réacteur Sol@rmet (Fig. 5), installé au foyer d'un four solaire de 2 kW, sur les oxydes MgO et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. L'influence des paramètres pression, température, flux gazeux, mélange réactif, granulométrie des réactifs ... est étudiée. Les poudres métalliques obtenues sont ensuite caractérisées sur le plan de la composition chimique (DRX, MEB-EDS) et de la granulométrie (Fig. 5)

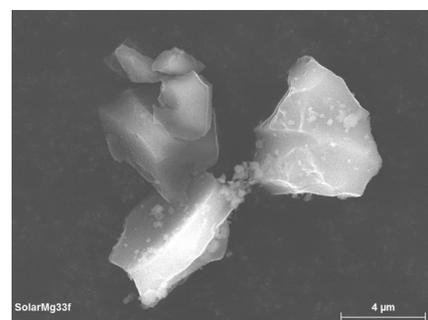


Figure 5 : Réacteur Sol@rmet au foyer du four solaire de 2 kW (en haut) et image MEB de particules de Mg obtenues par carbo-réduction solaire (en bas)

## 4. Production de combustibles de synthèse par thermochimie solaire

### 4.1. Production d'hydrogène/syngas à partir de ressources hydrocarbonées

Les travaux concernent le développement de procédés thermochimiques solaires pour la production de combustibles synthétiques ( $H_2$ , syngas et combustibles dérivés) sans émission de gaz à effet de serre. Les voies de synthèse considérées dans ce sous-thème sont le craquage et reformage du méthane, et la pyrolyse/gazéification de biomasse ou déchets en substituant à la combustion partielle de la charge une énergie extérieure fournie par des concentrateurs solaires. Ces procédés hybrides solaires présentent les avantages suivants : (1) économie de combustible et stockage chimique d'énergie solaire, (2) réduction ou suppression des émissions spécifiques de gaz à effet de serre par rapport aux procédés classiques, (3) non contamination des produits par les gaz de combustion.

#### 4.1.1 Craquage/reformage du méthane

La dissociation thermique ou thermo-catalytique d'hydrocarbures (méthane ou gaz naturel) permet la co-synthèse d'hydrogène et de nanostructures de carbone valorisables :  $CH_4 \rightarrow C_{solide} + 2H_2$  ( $\Delta H^\circ = 75 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ). Ce procédé de pyrolyse ne produit pas de  $CO_2$  et nécessite la mise au point de réacteurs opérant à haute température (expériences et modélisation) avec des taux de conversion de méthane et des rendements en hydrogène élevés. Les travaux concernent l'étude de l'activité catalytique de différents types de catalyseurs, la conception/modélisation de réacteurs solaires comme celui présenté sur la figure 6, et l'évaluation de leur performance sous flux solaire concentré. L'étude de la décomposition de méthane a été menée en collaboration avec IHI Corporation (Japon).

D'autre part, des procédés solaires de reformage du gaz naturel sont développés, avec pour finalité la production de syngas :  $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$  ( $\Delta H^\circ = 206 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ). Cette réaction a été mise en œuvre en boucle chimique en utilisant un oxydant solide réactif en tant que matériau porteur d'oxygène, par exemple  $CeO_2$  (post-doc de M. Nair et thèse de S. Chuayboon). Les avantages d'un tel procédé par rapport au procédé classique sont l'absence d'émission de  $CO_2$ , la génération d'un mélange gazeux utilisable pour la synthèse de méthanol, et l'absence de catalyseur coûteux. Il est de plus possible de produire de l'hydrogène pur dans une seconde étape ( $CeO_{2-\delta} + \delta H_2O \rightarrow CeO_2 + \delta H_2$ ) permettant de régénérer l'oxyde de départ. Ce procédé de reformage a par exemple été démontré en utilisant  $CeO_2$  sous forme de poudres ou de mousses poreuses réticulées dans différents réacteurs solaires à lit fixe ou à absorption volumique du rayonnement.

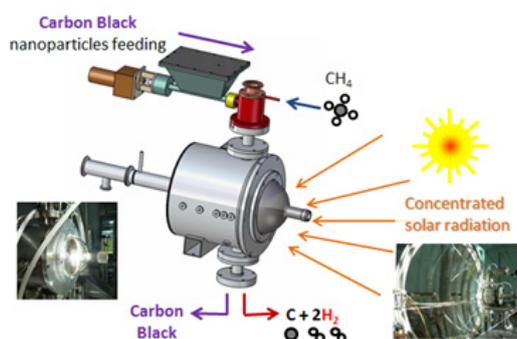


Figure 6 : Réacteur solaire prototype pour la décomposition thermocatalytique de méthane (collaboration IHI Japon)

#### 4.1.2 Production de syngas par pyrolyse/gazéification

Les travaux portent également sur les procédés de pyrolyse/gazéification de matières hydrocarbonées (biomasse, déchets) par voie solaire, avec pour objectif la production de syngas :  $CH_xO_y(s) + (1-y)H_2O \rightarrow (1+x/2-y)H_2 + CO$ .

Des réacteurs thermochimiques solaires (comme celui présenté sur la figure 7) permettant le traitement en continu de solides carbonés à 1000-1400°C sont développés. L'utilisation de l'énergie solaire pour la réaction de gazéification permet d'améliorer significativement la valorisation énergétique de charges telles que la biomasse lignocellulosique et la production de combustibles de synthèse. L'utilisation des hautes températures permet d'éliminer la production de goudrons au profit de la production du syngas. Des études expérimentales et théoriques sont menées afin d'identifier les conditions optimales permettant de maximiser l'efficacité du réacteur solaire. Les résultats confirment la faisabilité de la conversion de charges carbonées solides en fonctionnement continu et le stockage effectif de l'énergie solaire sous forme d'un gaz de synthèse de grande qualité (thèse de S. Chuayboon). La modélisation détaillée et l'hybridation du procédé sont également développées (thèse de H. Boujjat). Cette thématique a été développée en collaboration avec le CEA/LITEN avec le soutien de l'ADEME (thèses de Q. Bellouard et H. Boujjat).

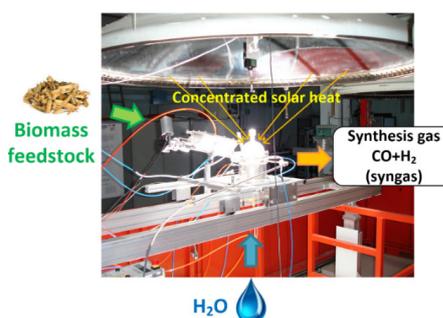
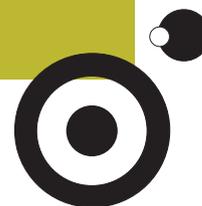


Figure 7 : Procédé solaire de gazéification de biomasse pour la production de syngas en continu



#### 4.2. Dissociation de l'eau et du CO<sub>2</sub> par cycles thermochimiques

Les cycles thermochimiques basés sur des matériaux redox comportent une première étape de réduction thermique de l'oxyde et une seconde étape d'oxydation produisant H<sub>2</sub> (et/ou CO) et l'oxyde de départ qui peut être recyclé dans la première étape solaire.

- (1) Etape de réduction (solaire) :  $M_xO_y \rightarrow M_xO_{y-1} + \frac{1}{2} O_2$  (endothermique, T1)  
 (2) Etape d'oxydation :  $M_xO_{y-1} + H_2O(CO_2) \rightarrow M_xO_y + H_2(CO)$  (exothermique, T2)

La pureté de l'hydrogène produit permet son utilisation directe dans une pile à combustible. En combinant H<sub>2</sub> et CO, le syngas peut être converti en carburants liquides synthétiques. La valorisation du CO<sub>2</sub> par voie solaire permet son recyclage en carburant, et représente une alternative à sa séquestration directe. Les recherches se focalisent par exemple sur des cycles à base d'oxydes métalliques (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/FeO, ZnO/Zn, SnO<sub>2</sub>/SnO, CeO<sub>2</sub>/CeO<sub>2-δ</sub>) ou d'oxydes mixtes non stœchiométriques comme la cérine dopée et les pérovskites (projet ANR SUNFUEL, 2016-2020). Les travaux concernent la synthèse et la caractérisation de matériaux échangeurs d'oxygène, et la détermination de leur performance thermochimique pour la dissociation de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> (post-doc de M. Nair et thèse de A. Haeussler). Les matériaux sont élaborés sous forme de structures poreuses (mousses réticulées, matériaux macroporeux) pour leur intégration dans des réacteurs solaires dédiés. Pour certains oxydes tels que MgO et ZnO, des cycles alternatifs utilisant un réducteur carboné sont étudiés afin d'abaisser la température (thèse de S. Chuayboon). La mise en œuvre des différents cycles implique de synthétiser et caractériser les matériaux réactifs, d'étudier la réactivité des systèmes solide-gaz, puis de concevoir et évaluer des récepteurs/réacteurs solaires innovants (comme ceux présentés sur la figure 8).

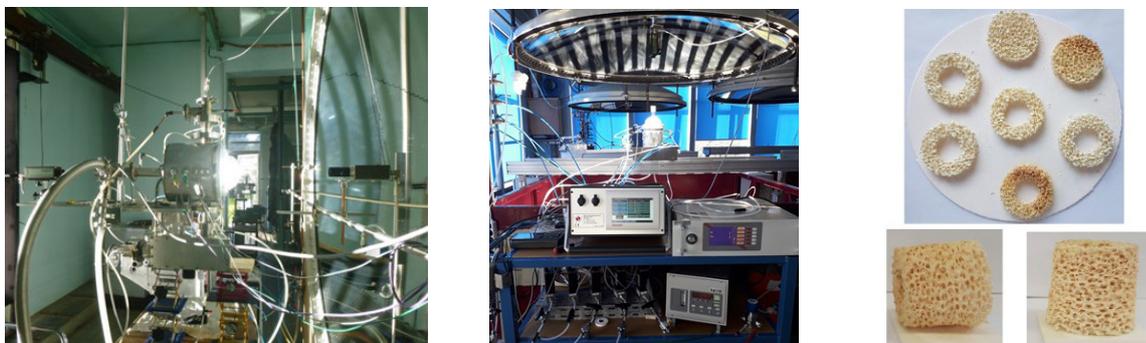


Figure 8 : Réacteurs solaires pour la production de carburants de synthèse par dissociation de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> et mousses poreuses réactives en cérine (ANR SUNFUEL)

#### 4.3. Stockage thermochimique d'énergie par réactions réversibles.

Les cycles thermochimiques sont développés pour le stockage thermochimique de l'énergie solaire à haute température par réactions réversibles solide/gaz :  $AB(s) + \Delta H \rightleftharpoons A(s) + B(g)$ . Ce type de stockage peut être associé aux centrales solaires thermodynamiques pour la génération d'électricité en continu ou plus généralement pour fournir de l'énergie dans des procédés solaires à haute température. L'effet thermique des réactions endo/exothermiques peut être exploité si la réaction est réversible. La phase de stockage correspond à la décomposition endothermique du solide, effectuée avec apport d'énergie solaire. La phase de déstockage correspond à la réaction inverse afin de restituer l'énergie emmagasinée, qui peut être transférée au fluide caloporteur dans une centrale solaire.

Les systèmes les plus adaptés pour le stockage d'énergie à haute température (400-1200°C) ont été sélectionnés et étudiés (thèse de L. André, 2014-2017). L'utilisation de paires redox ou d'oxydes mixtes permet de réaliser des cycles sous air en boucle ouverte ( $MO_{2x+1} + \Delta H \rightleftharpoons MO + xO_2$ ). Des recherches ont été menées sur la modification des propriétés redox grâce à la synthèse d'oxydes mixtes (systèmes binaires d'oxydes Co-Fe, Co-Cu, Mn-Co, Mn-Fe, Mn-Cu), ainsi que sur l'effet de la méthode de synthèse/composition sur la réactivité (Fig. 9). Des travaux basés sur le calcul des équilibres thermodynamiques, utilisant des modèles de type Calphad, ont été réalisés pour l'optimisation de la composition des oxydes mixtes (collaboration LGC-Toulouse). Par ailleurs, des travaux ont également été menés sur le développement des systèmes à base de carbonates et hydroxydes, ainsi que d'oxydes conducteurs ioniques (pérovskites  $ABO_3$ ) qui peuvent être des candidats intéressants pour le stockage thermo-chimique. Enfin, un nouveau concept de réacteur solaire solide-gaz à lit mobile a été validé expérimentalement dans le cas de la calcination en continu de particules réactives à haute température (1000°C environ), en utilisant  $CaCO_3/CaO$  comme système de stockage.

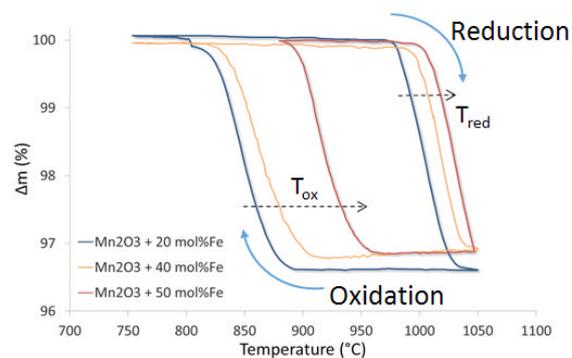


Figure 9 : Cycles redox de stockage à partir d'oxydes mixtes Mn-Fe montrant la réversibilité des réactions et une diminution de l'hystérésis en température avec l'augmentation de la teneur en Fe

## AXE 2: CONVERSION, STOCKAGE ET TRANSPORT DE L'ÉNERGIE



43 > 49

TRECS



51 > 58

SHPE



59 > 69

TES



71 > 78

COSMIC



79 > 86

SENSE





## Présentation de l'équipe

Responsable : A. Toutant (MCF UPVD)

Permanents : F. Bataille (Pr UPVD), B. Claudet (Pr UPVD), 50%, Q. Falcoz (MCF UPVD), 50%, O. Faugoux (MCF UPVD), A. Ferrière (CR CNRS), G. Flamant (DR CNRS), S. Mer (MCF UPVD), P. Neveu (Pr UPVD), 50%, G. Olalde (DR CNRS), A. Toutant (MCF UPVD), A. Soum-Glaude (IR CNRS), 50%.

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : M. Bellec (date soutenance : 04/01/17), M. Belot (date soutenance : 21/11/18), A. Du Cluzeau (date soutenance : 31/09/19), J. Charon (date soutenance : 12/12/17), M. Coquand (date soutenance : 16/03/18), D. Dorian (date soutenance : 27/11/18), Y. Lalau (date soutenance : 29/11/17), F. Larroutou (date soutenance : 16/11/15), C. Leray (date soutenance : 21/02/17), S. Mey (date soutenance : 09/05/16), D. Verdier (date soutenance : 39/01/16), K. Zeng (date soutenance : 01/04/16), J.M. Avellaneda (date soutenance : 20/12/19); (2) thèses en cours : T. Barbe (début 10/19), F. Bonzoms (début 11/19), 50%, A. Carling Plaza (début 01/18), 50%, M. David (début 10/18), P.H. Defieux (début 09/17), R. Gueguen (début 12/19), S. Hamidi (début 10/18), M. Keilany (début 02/17), 50%, P. Lapeyre (début 11/17), I. Perez Lopez (début 05/16), D. Poncin (début 10/17), B. Rebouillat (début 10/18), 50%, R. Reoyo-Prats (début 09/16), 50%, S. Vannerem (début 10/18), 50 %.

Post doctorants : E. Thibaut, B. Grange  
CDD recherche : A. Le Gal, J. Osorio, A. Saraiva  
CDD gestion : L. Gonzales, A. Badziaka

Mots clés

Modélisation et expérimentation de récepteurs haute température ; vieillissement des matériaux sous haut flux radiatif ; intensification des transferts en régime turbulent ; transferts couplés.

Références

2, 16, 30, 31, 42, 43, 45, 48, 62, 63, 64, 68, 69, 74, 83, 101, 105, 107, 108, 109, 117, 121, 122, 135, 138, 139, 143, 146, 151, 152, 153, 154, 155, 158, 163, 169, 178, 182, 185, 190, 196, 210, 211, 214, 217, 218, 227, 231, 237, 238, 239, 243, 246, 248, 250, 263, 264, 266, 270, 271, 272, 292, 296, 307, 308, 316, 317, 318, 330, 352, 353, 359, 360, 361, 373, 376, 377, 382, 383, 389, 399, 402, 403, 413, 421, 425, 426, 429, 431, 433, 438, 441, 443, 444, 445, 448, 464, 476, 497, 501, 510, 511, 514, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 541, 542, 543, 544, 548, 559, 562, 563, 570, 579, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 602, 604, 607, 610, 612, 625, 626, 627, 628, 633, 634, 650, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 680, 683, 684, 694, 701, 709

### THÈMES

1. Physique des transferts couplés dans les récepteurs solaires à haute température
2. Développements expérimentaux avec les grandes installations solaires

### COLLABORATIONS

Collaborations nationales  
IMT (Albi), LGC (Toulouse), IMFT (Toulouse), IRCER (Limoges), EDF (Paris), CEA (Chambéry, Grenoble, Paris), ICSM (Marcoule), IFPEN (Paris), Total (Paris), SUNCNIM (Llo), Comessa (Strasbourg)

### Collaborations internationales

Allemagne : DLR (Cologne), Fraunhofer (Freiburg)  
Argentine : PROBIEN (Buenos Aires)  
Belgique : KU Leuven (Leuven), EPPT (Anvers)  
Espagne : CIEMAT (Almería), IMDEA (Madrid), UCM (Madrid), INTA (Madrid), Abengoa (Séville)  
Etats Unis : LLNL (Livermore), Sandia (Albuquerque)  
Inde : CSIR-National Aerospace Labs (Bangalore)  
Israël : Brightsource (Jérusalem), HUJI (Jérusalem), BGU (Beer-Sheva)

Royaume-Uni : Université de Manchester (Manchester)  
Russie : Makarov State Maritime Academy (St Petersburg)

### CONTRATS

SolPart (H2020, 2015, 48 mois, coordinateur) ; NextCSP (H2020, 2016, 48 mois, coordinateur) ; Polyphem (H2020, 2017, 48 mois, coordinateur) ; NESTER (H2020, 2015, 36 mois, partenaire) ; RAISELIFE (H2020, 2015, 48 mois, partenaire) ; INSHIP (H2020, 2016, 48 mois, partenaire) ; CARAPASS (ANR, 2016, 48 mois, partenaire) ; OPTICLINE (ANR, 2017, 48 mois, partenaire)

- en bref -



## • Rapport Scientifique •

### Introduction

#### Contexte

La capacité mondiale de production d'électricité par les centrales solaires à concentration a atteint 5,5 GW. La recherche internationale se concentre sur les nouveaux concepts de collecteur, récepteur, stockage thermique, fluide caloporteur et cycle thermodynamique pour dépasser les performances actuelles. D'autres utilisations des technologies solaires ont été développées pour produire de la chaleur industrielle. L'équipe Thermophysique, Rayonnement et Ecoulement pour les Centrales Solaires (TRECS) inscrit sa stratégie de recherche dans le domaine d'application des centrales solaires à haut rendement mettant en œuvre des récepteurs solaires et des cycles thermodynamiques à très haute température. La thermochimie solaire est également abordée sous l'angle des réacteurs solaires solide-gaz. L'équipe TRECS est née de la fusion des équipes RCS (Rayonnement et Centrales Solaires) et TEC (Thermophysique et Ecoulement). Préconisée lors de la dernière évaluation, cette fusion a eu pour objectif de rapprocher les études amont sur le vieillissement des matériaux et les écoulements des expérimentations sur les prototypes de centrale solaire.

#### Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques sont l'intensification des transferts dans l'étape de conversion du rayonnement solaire en chaleur (en limitant les pertes thermiques et les pertes de charge), la caractérisation du vieillissement des matériaux composant les récepteurs, la recherche de nouveaux procédés de conversion par des composants et des architectures innovantes, et la prédiction des performances des systèmes intégrant ces composants notamment les systèmes de stockage. Le développement de récepteurs solaires à air ou utilisant un mélange dense gaz/particules, de forte puissance et à haute température, constitue un verrou majeur dans le développement des nouvelles centrales à haut rendement et il concentre les efforts de l'équipe TRECS. Il combine les problématiques liées à des facteurs de concentration optique élevés, des transferts radiatifs en géométrie complexe et/ou en milieu semi-transparent, du vieillissement des matériaux soumis à de haut flux solaire, l'intensification des transferts convectifs en régime turbulent et la complexité de la distribution des fluides.



## 1. Physique des transferts couplés dans les récepteurs solaires à haute température

### 1.1 Thermophysique

#### 1.1.1 Vieillessement par exposition cyclique rapide à haute température

Le dispositif SAAF (Solar Accelerated Aging Facility) génère un vieillissement accéléré de matériaux utilisés dans les récepteurs solaires, en leur appliquant des agressions thermiques dont les paramètres (amplitude, période, etc.) sont choisis de façon à engendrer les plus fortes contraintes. Il est actuellement utilisé pour suivre le vieillissement de nouveaux matériaux pour récepteurs solaires dans le projet européen RAISELIFE débuté en 2016 (thèse de Reine Reoyo-Prats). Notre contribution consiste à déterminer quel sera le meilleur matériau (substrat plus revêtement) c'est-à-dire celui qui aura le meilleur rendement thermique malgré des expositions répétées à des flux intenses et répétés. Les échantillons fournis par nos partenaires sont soumis à des cycles agressifs et leurs propriétés optiques sont mesurées à différentes échéances. Le vieillissement est également caractérisé par le suivi des propriétés thermophysiques. Pour cela, nous développons des méthodes d'estimations de ces propriétés utilisant des outils de l'intelligence artificielle, en collaboration étroite avec l'équipe COSMIC. Les récentes avancées montrent que nos méthodes permettent d'estimer de façon simultanée des propriétés thermophysiques corrélées, à partir de mesures effectuées par méthode photothermique. C'est un résultat remarquable car les méthodes inverses traditionnelles ont des difficultés à faire la même chose.

Dans le cadre de la thèse de Yasmine LALAU, (collaboration avec l'Institut de Recherche sur les Céramiques (IRCER) de Limoges, projet SFERA 2), un nouveau banc expérimental, baptisé IMPACT (In situ thermoMechanical Probe by ACoustic Tracking), a été mis au point. Il s'appuie sur l'utilisation de l'émission acoustique : les salves acoustiques émises par l'échantillon soumis à des chocs thermiques sont enregistrées. Leur nombre est significatif de l'évolution de l'endommagement et leurs paramètres de forme (comme l'amplitude, la durée ou la fréquence) permettent de caractériser le type d'endommagement (microfissuration, dislocation, décohésion, etc.). L'activité autour du dispositif IMPACT va se poursuivre avec une thèse qui démarrera en septembre 2019, dans le cadre du projet SFERA 3. Il s'agira cette fois de caractériser un récepteur complet en conditions de fonctionnement.

#### 1.1.2 Vieillessement par exposition continue à haute température

La caractérisation thermo-optique avancée et la tenue au vieillissement d'absorbeurs solaires sélectifs (forte absorption solaire, faible émissivité IR) pour récepteurs solaires à  $T < 700^{\circ}\text{C}$  ont été étudiées, sur des revêtements multicouches TiAlN et W/SiC (ADEME LFR500, ANR ASTORIX, CEFIPRA 5908-1) et des pastilles nanocomposites SiC-TiC (ANR CARAPASS). Des échantillons ont été recuits à long terme, en four électrique à l'air ambiant, de  $[500^{\circ}\text{C} - 1000 \text{ h}]$  à  $[800^{\circ}\text{C} - 100 \text{ h}]$  (vieillessement accéléré cumulatif de période 24 h). L'évolution des propriétés optiques a été suivie par des mesures, après chaque étape de vieillissement, de la réflectance spectrale dans la gamme 250 nm - 25  $\mu\text{m}$ , qui permettent le suivi dans le temps des performances optiques des matériaux (absorptance solaire / émissance) et, en considérant des lois de dégradation type Arrhénius, de prédire leur « durée de vie optique ». En complément, certains matériaux ont fait l'objet de mesures optiques plus poussées (réflectance angulaire et en température jusqu'à  $500^{\circ}\text{C}$ , émissivité à haute température MEDIASE). La caractérisation microstructurale (MEB/EDS, XPS, AFM/profilométrie) a mis en évidence des phénomènes thermo-induits de type oxydation et diffusion atomique, provoquant des changements de composition et de structure (densité, rugosité de surface, épaisseurs de couches) des absorbeurs, qui dégradent leurs performance et durabilité. Ces études ont permis de mieux orienter les stratégies de conception et d'élaboration de ces matériaux.

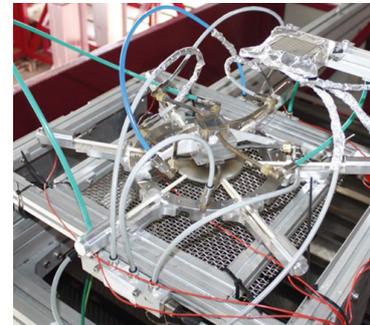


Figure 1 : Echantillon placé sur la dispositif expérimental IMPACT

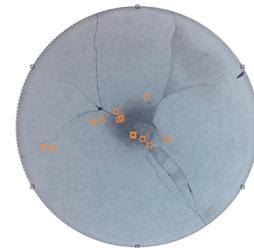


Figure 2 : Echantillon fissuré, localisation des événements acoustiques en orange.

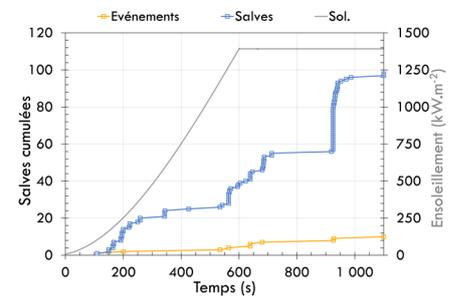


Figure 3 : Ensoleillement, nombres de salves et événements en fonction du temps. Rupture de l'échantillon à 920 s.

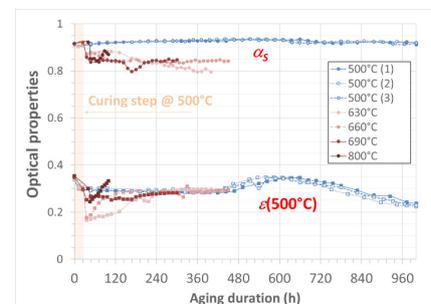


Figure 4 : Évolution des propriétés optiques de revêtements sélectifs TiAlN avec la durée de vieillissement à différentes températures.

### 1.2 Rayonnement

Les récepteurs surfaciques et volumiques à haute température sont le siège de transferts de chaleur par rayonnement. Pour augmenter leurs rendements de conversion thermo-solaires nous avons développé des modèles de transferts radiatifs et étudié l'influence des propriétés radiatives et des transferts radiatifs sur les transferts couplés.

Les rendements thermiques maximum de récepteurs à particules (1D) ont été évalués pour des matériaux à propriétés radiatives réelles et théoriques (Ordonez et al., 2014). Pour des récepteurs surfaciques, les températures maximales des parois de récepteurs ont été déterminées pour des récepteurs externes et à cavité (Larroturou et al., 2014 et 2016). Le rôle de la réflectivité directionnelle des parois des cavités a été identifié et l'étude de motifs bi-périodiques de microstructuration de la surface a démontré une amélioration de la sélectivité spectrale de céramiques à haute température. L'influence de la géométrie interne de récepteurs volumiques poreux a été étudiée expérimentalement et numériquement. Un banc de caractérisation des rendements thermiques a été développé (Mey et al., 2016). Les résultats expérimentaux ont montré l'augmentation des rendements avec l'augmentation de la surface spécifique des récepteurs poreux ainsi que l'influence de la sélectivité spectrale. La confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats du modèle d'homogénéisation des récepteurs poreux (Kribus et al., 2014) a souligné l'importance de la connaissance des propriétés effectives d'échange par convection et de son lien avec la géométrie intrinsèque du milieu poreux.

La fabrication additive permet d'utiliser des structures régulières poreuses comme récepteurs volumiques à haute température. De nouvelles géométries de récepteurs ont été modélisées (Fig. 5, Caliot et Déjardin, 2018), notamment composées de cellules de Kelvin. Ces premiers résultats de simulation des transferts couplés en géométrie détaillée ont souligné l'influence de la géométrie (épaisseurs des brins) sur le rendement thermique de conversion. Des validations expérimentales sont prévues.

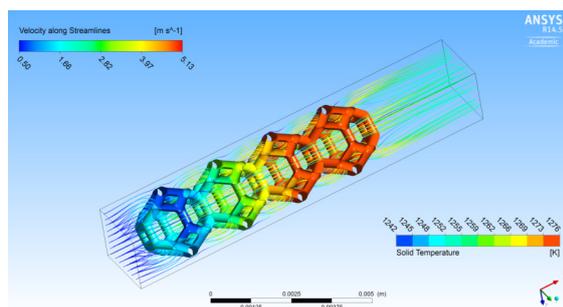


Figure 5 : Simulation de transferts couplés dans un absorbeur type cellules de Kelvin (diamètre cellule, 2 mm ; diamètre brin, 0,3 mm). Les lignes de courant sont colorées par la vitesse ; les brins solides sont colorés par la température.

### 1.3 Ecoulement

Les récepteurs solaires à haute température sont le siège d'écoulements turbulents fortement anisothermes et/ou diphasiques au sein de géométries complexes. D'un point de vue technologique, nous proposons des géométries internes afin d'intensifier les transferts thermiques tout en minimisant les pertes de charge et les contraintes thermomécaniques. D'un point de vue scientifique, nous développons une stratégie multi-échelles où chaque niveau de description physique est associé à une stratégie numérique et à des moyens de diagnostics expérimentaux. Nous développons des modèles capables de prendre en compte les interactions entre la vitesse et la température et/ou le caractère diphasique de l'écoulement. Pour ce faire, nous utilisons une approche par remontée d'échelles où les simulations à niveau de description plus détaillé permettent de renseigner les modèles plus macroscopiques.

La technologie que nous avons la plus étudiée correspond aux récepteurs solaires surfaciques à haute température à gaz sous-pression. Des simulations numériques directes (SND) ont été réalisées (thèse de D. Dupuy). Ces simulations représentent explicitement toutes les échelles de la turbulence et le couplage avec la température. Elles servent de référence pour le développement de modèles de simulations des grandes échelles (SGE). Pour ce faire, les résultats sont filtrés par application d'une moyenne volumique à l'échelle de résolution des SGE (voir Fig. 6). A partir des SND, on étudie également les échanges énergétiques entre les différentes parties de l'énergie totale. Pour cela, on a proposé une nouvelle représentation des échanges énergétiques qui permet de caractériser l'effet du gradient de température sur les transferts d'énergie cinétique turbulente dans les domaines spatial et spectral. Pour compléter ces études numériques, des expériences en soufflerie avec mesure de vitesse par stéréovélocimétrie par images de particules ont été conduites (thèse de M. Bellec). Elles ont notamment permis d'intensifier les transferts de chaleur en combinant des générateurs de tourbillons et des riblets.

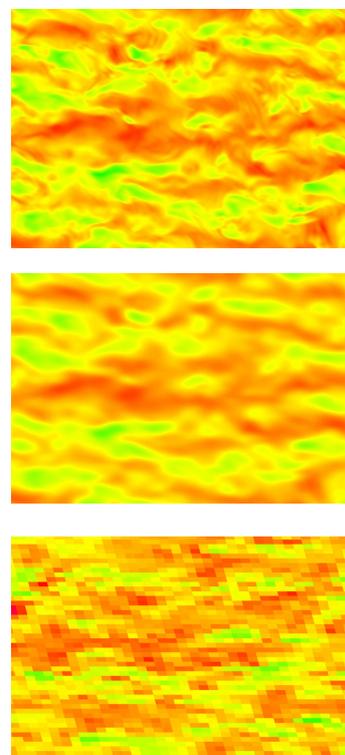


Figure 6 : Champs de vitesse d'un écoulement turbulent de type canal plan soumis à un fort gradient de température. De haut en bas : simulation numérique directe, simulation numérique directe filtrée, simulation des grandes échelles.



Par ailleurs, nous avons analysé les irréversibilités thermiques et visqueuses liées à l'écoulement du fluide dans le récepteur solaire (thèse de J.M. Avellenada). Nous avons étudié la puissance entropique générée au sein de l'écoulement en adoptant trois axes d'analyse : (1) l'étude détaillée de la puissance entropique générée dans une couche limite dynamique et thermique laminaire (2) l'utilisation du calcul variationnel afin de déterminer quels champs de vitesses optimisent une fonctionnelle objective liée à la puissance entropique générée (3) l'étude de la puissance entropique générée dans un écoulement turbulent et pour un fluide dont les propriétés thermophysiques dépendent de la température.

Enfin, la technologie à génération directe de vapeur nécessite également la compréhension et la modélisation du couplage turbulence/interface. Ce couplage a été étudié par une thèse en collaboration avec le CEA. Des SND d'écoulement à bulles dans un canal plan ont permis de proposer de nouveaux modèles pour l'approche RANS Euler-Euler. Enfin, dans le cadre d'un stockage thermocline avec matériaux à changement de phase (thèse et collaboration avec l'IFPEN), des SND d'un écoulement par convection naturelle au sein d'une sphère ont permis le développement d'une corrélation pour le coefficient d'échanges fluide-paroi.

## 2. Développements expérimentaux avec les grandes installations solaires

### 2.1 Nouveaux concepts de centrales solaires

#### 2.1.1 Filière à caloporteur gaz pressurisé

Dans ce concept le récepteur solaire est intégré dans le cycle à gaz. L'objectif est de maximiser l'apport thermique d'origine solaire par chauffage de l'air du cycle, mis en pression par le compresseur, dans un récepteur placé en série ou en parallèle de la chambre de combustion de la turbine à gaz. L'objectif visé est d'atteindre 800°C et plus, avec une perte de charge inférieure à 5%. Deux familles de récepteurs solaires sont envisagées : récepteur en matériau céramique de type SiC ou en super alliage métallique à base Nickel [brevet 2014]. Les enjeux portent sur la distribution du fluide dans les canaux et le contrôle de la distribution de flux solaire pour uniformiser la température de surface, la maîtrise des écoulements turbulents pour accroître les transferts thermiques en paroi, l'optimisation de la conduction thermique dans le récepteur pour réduire l'écart de température entre la surface exposée et la face arrière.

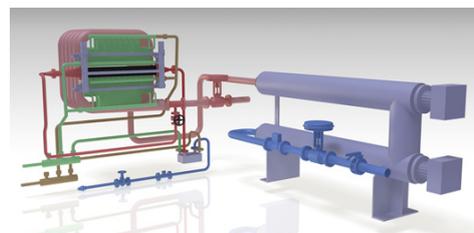


Figure 7 : Mini-Pegase à Thémis. Récepteur solaire (haut) et boucle à air pressurisé (bas).

Un volet du projet européen STAGE-STE (FP7, 2014-2018) a fourni le cadre pour expérimenter sur la boucle Mini-Pegase de Thémis un absorbeur solaire en SiC (Fig. 7). Le comportement thermomécanique a été évalué avec succès, révélant toutefois une faiblesse critique dans l'assemblage au niveau de la brasure entre deux coques céramiques [Leray et al., 2017]. Par ailleurs le projet européen H2020 POLYPHEM permet de poursuivre les travaux sur le récepteur solaire métallique, dont la conception a été modifiée pour diminuer les pertes de charge à pression réduite et permettre l'assemblage de modules [brevet 2015]. Le concept proposé dans POLYPHEM est un cycle combiné solaire de faible puissance (400 kWth), dans lequel une boucle de stockage par thermocline à caloporteur huile récupère le rejet thermique de la turbine à gaz et offre de la flexibilité à la production électrique du cycle aval (Fig. 8).

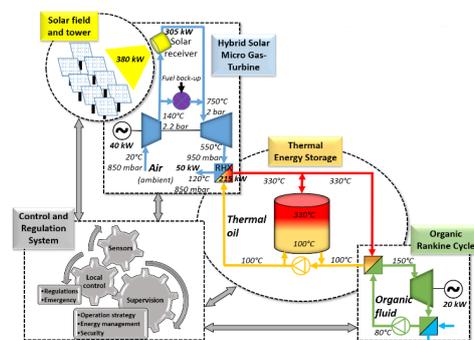


Figure 8 : Cycle combiné solaire de faible puissance avec récepteur solaire intégré à la turbine à gaz et stockage intermédiaire à moyenne température.

### 2.1.2 Suspensions denses de particules fluidisés

Au plan international des recherches actives sont engagées pour augmenter la température de fonctionnement des centrales solaires afin d'accroître le rendement de conversion. La mise en œuvre de cycles supercritiques (700-750°C) et combinés (800°C et plus) est visée. Cet objectif implique l'utilisation de fluides caloporteurs stables à ces températures. Dans le cadre du projet européen H2020 Next-CSP coordonné par PROMES, nous avons choisi de développer le concept du récepteur à particules fluidisées circulant en phase dense dans des tubes soumis au rayonnement solaire.

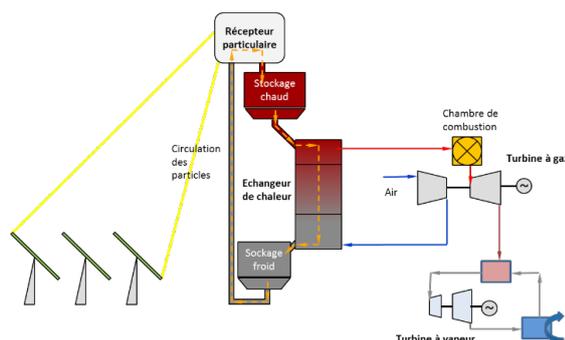


Figure 9 : Centrale solaire comportant un cycle combiné et une suspension dense de particules comme fluide caloporteur dans le récepteur et pour le stockage à haute température.

Ce concept permet d'utiliser les particules comme fluide de transfert et matériau de stockage. Il est proposé de le coupler à un cycle combiné en mode hybride ou solaire seul (Figure 9).

Les enjeux scientifiques concernent la stabilité des écoulements de particules fluidisées dans des tubes longs par rapport à leur diamètre, les transferts de chaleur paroi-suspension et le contrôle de la répartition du rayonnement solaire incident sur les tubes absorbants. Les enjeux technologiques sont liés à la circulation des particules en boucle fermée et à l'intégration d'une turbine à gaz dans le bloc de puissance. Le pilote (récepteur solaire de 3 MWth) doit être installé à Thémis en 2019.

### 2.2 Réacteurs gaz-solide pour le traitement thermochimique solaire de particules

Cette activité concerne la pyrolyse solaire de biomasse (labex SOLSTICE, collaboration avec l'IMT Mines d'Albi et PROBIEN, Argentine) et la calcination solaire de carbonates (projet européen H2020 SOLPART coordonné par PROMES).

La pyrolyse de bois bruts et pollués par des métaux a été réalisée à température et vitesse de chauffage variables (600-2000°C et 10-450°C/s) au foyer d'un four solaire de 1 kW. Les travaux ont porté sur l'évolution des produits de pyrolyse (gaz, liquide et solide) et sur leur caractérisation. Un modèle complet de pyrolyse a été proposé et validé par comparaison aux résultats expérimentaux.

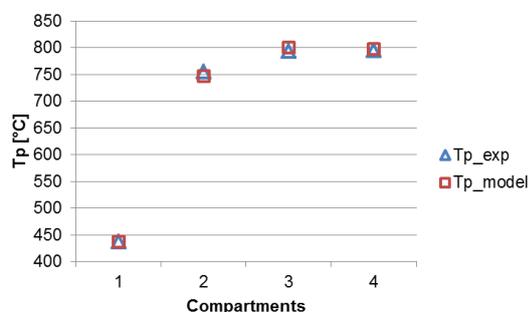


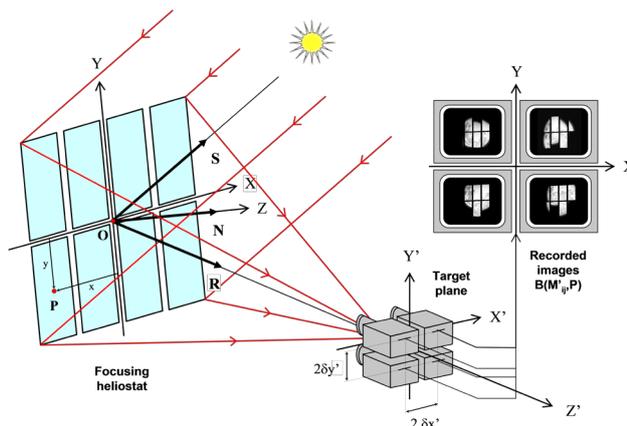
Figure 10 : Comparaison des températures de particules mesurées et simulées (dolomie, débit 9,2 kg/h).

Les recherches sur la calcination solaire ont pour objectif plus large d'étudier des concepts de récepteurs/réacteurs solaires adaptés à la réalisation de réactions solide gaz dans le domaine de température 500-900°C. La mise en œuvre de particules de taille variable, le contrôle de la température et du temps de séjour des particules sont les enjeux majeurs de ces développements. Dans le cadre du projet H2020 SOLPART Un réacteur horizontal à lit fluidisé compartimenté a été testé avec succès au foyer du four solaire de 1000 kW dans le cas de la décomposition de la dolomie. Le dispositif a été modélisé et simulé (Figure 10).



### 2.3 Modélisation et caractérisation optiques

Un modèle de prédiction des flux solaires concentrés par Monte-Carlo a été développé (Caliot et al., 2015) et implémenté dans un logiciel (Solstice) gratuit et open source financé par le Labex Solstice. Ce logiciel qui gère des géométries complexes et des propriétés spectrales a notamment servi pour la définition de la stratégie de pointage du récepteur du projet européen Next-CSP (Grange et al., 2018). Il a aussi permis d'étudier l'influence de la géométrie sur l'efficacité de récepteurs volumiques solaires à haute température (Caliot et Déjardin, 2018).



Deux méthodes de caractérisation de l'orientation et des déformations de miroirs d'héliostats ont été développées. La première (brevet Hénault et Caliot, 2015) utilise plusieurs caméras pour prendre des images du soleil vu au-travers de sa réflexion sur les facettes réfléchissantes des héliostats. Des premiers résultats numériques confirment le potentiel de la méthode (Coquand et al., 2017) et offrent des perspectives d'amélioration (Henault et al., 2018). La validation expérimentale est en cours à Thémis. La deuxième méthode consiste à identifier les défauts d'orientations des facettes d'héliostats grâce à la comparaison de cartographies de flux solaires concentrés sur une cible blanche et des simulations (Sanchez-Gonzales et al., 2017). Cette méthode validée expérimentalement à Thémis a permis d'améliorer la précision optique d'une vingtaine d'héliostats.

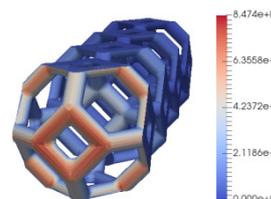
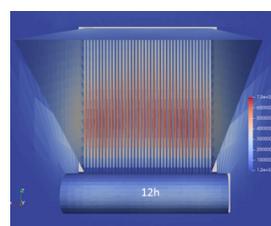
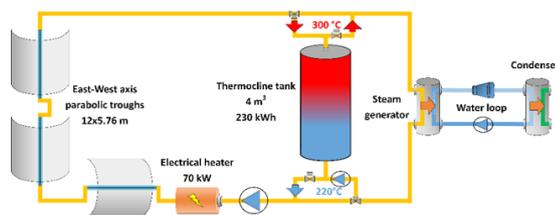


Figure 11 : (haut) Schéma de principe du dispositif utilisé pour la méthode de rétro-visée à quatre caméras placées proche du récepteur ; Résultats de calculs du logiciel Solstice : (milieu) Distribution du flux solaire concentré sur le récepteur Next-CSP ; (bas) Distribution du flux solaire concentré dans une rangée d'un récepteur volumique composé de cellules de Kelvin.

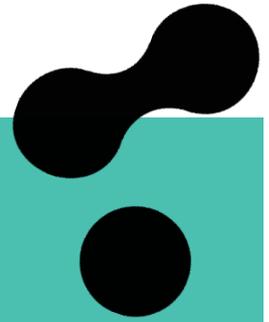
### 2.4 Intégration du stockage thermocline dans les centrales solaires

La flexibilité de la production d'électricité par une centrale à énergie solaire concentrée est apportée par son stockage thermique. Pour diminuer le coût du stockage, une solution consiste à n'utiliser qu'une seule cuve garnie d'un matériau de stockage qui remplace le fluide caloporteur. Grâce à l'utilisation d'une boucle solaire à collecteurs cylindro-paraboliques intégrant un stockage thermocline, une étude a été menée sur l'impact de la variation de la température en sortie du réservoir de stockage de type thermocline sur le rendement des autres composants de la centrale.

La comparaison des performances entre le stockage thermocline et le stockage traditionnel à deux cuves montre qu'en surdimensionnant le réservoir thermocline de 11%, on peut obtenir une production électrique équivalente et réduire le coût du stockage de 30% au moins. Ces résultats prometteurs démontrent que le stockage thermocline est adapté aux centrales solaires à concentration.







## Présentation de l'équipe

Responsable : V. Goetz (DR/CNRS)

Permanents : X.Py (PR/UPVD), P.Nevu (PR/UPVD, 50%), G. Plantard (PR/UPVD), D. Sacco (PR/UPVD jusqu'au 10/2018), Q. Falcoz (MDC/UPVD, 50%), R. Olives (MDC/UPVD), J.M. Mancaux (IGE/UPVD), N. Sadiki (Cher. Ass./Conv. Ed. Nat.)

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : H. Espargillière (08/03/2017), T. Fasquelle (10/11/2017, 50%), E. Kenda (08/12/2017, 50%), T. Nahhas (27/10/2017), C. François (25/05/2016, 50%), A. Rosset (04/05/2017, 50%), C. Telegang Chekem (06/09/2017, 50%), N. Lopez Ferber (30/11/2018, 50%), H. Al Jabri (11/12/2018, 50%), G. K. Ko (10/05/2019, 50%) ; (2) thèses en cours : C. Dezani (09/2017), A. Dupont (10/2018, 50%), D. Leroux (09/2019, 50%), C. Li (12/2018, 50%), D. Lorfing (09/2018, 50%), B. Rebouillat (02/2018, 50%), E. Ribeiro (09/2017), A. Touzo (02/2018, 50%), X. Haoxin (08/2015, 50%), D. Leroux (09/2019).

Post doctorants : B. Reoyo-Prats (01/2018-06/2019), C. Telegang Chekem (01/2018-06/2019), T. Nahhas (09/2017-09/2018)

CDD recherche : Y. Lalau (09/2018-06/2019), V. Estenne (06/2018-06/2019)

ATER : S. May Cloutier (09/2015-09/2016), H. Espargillière (10/2017-08/2018)

Mots clés

Stockage, Energie, Oxydation avancée, Détoxification, Solaire

Références

20, 30, 36, 37, 38, 41, 46, 49, 50, 55, 87, 92, 94, 106, 107, 111, 113, 115, 116, 131, 133, 134, 140, 141, 142, 147, 183, 184, 185, 191, 192, 204, 207, 209, 213, 226, 244, 252, 253, 261, 268, 280, 318, 320, 324, 327, 331, 338, 339, 340, 342, 345, 346, 347, 351, 354, 388, 391, 400, 407, 408, 412, 415, 441, 447, 448, 451, 452, 457, 458, 477, 478, 479, 480, 482, 515, 516, 517, 518, 534, 535, 536, 537, 538, 548, 549, 550, 551, 554, 555, 556, 557, 559, 575.

- en bref -



### THÈMES

1. Valorisation de déchets et stockage d'énergie solaire à haute température
2. Oxydation avancée par voie solaire pour la détoxification d'effluents

### COLLABORATIONS

#### Collaborations nationales

HSM (Montpellier), LGC (Toulouse), GEPEA (Saint-Nazaire), Institut Pascal (Clermont-Ferrand), Cirimat (Toulouse), Véolia (Montpellier-Perpignan), Rapsodee (Albi), CEMHTI (Orléans), ETC (Perpignan), Art-Dev (Montpellier).

#### Collaborations internationales

Burkina Fasso : 2iE (Ouagadougou)  
Maroc : Univ. Caddy Ayyad (Marrakech)  
Espagne : GREA (Leida)  
Singapour : NTU (Singapour)  
Qatar : Masdar Institute

### CONTRATS

EUROSUNMED (H2020, 2013, 48 mois, partenaire) ; INPATH TES (H2020, 2015, 36 mois, partenaire) ; DryRSP (ANR, 2013, 48 mois, coordinateur) ; CNRS-ETC (Industriel, 2015, 36 mois) ; CNRS-Veolia-IRD (industriel, 2018, 12 mois reconduit 12 mois) ; ECOSTOCK 1000 (CMI, 2015, 24 mois reconduit 24 mois,

partenaire) ; ISOTE (Conv. Maturation, 2018, 12 mois, partenaire) ; Volubilis (PIA/PHC, 2013, 48 mois, partenaire), CNRS-2iE (Contrat Coll. Rech., 2013, 36 mois) ; Chercheur d'Avenir (Région Lang. Rous., 2013, 48 mois, coordinateur) ; SUDOE 4KETs4ReUSE (Conv support IRD-CNRS, Sub/Aide Reg. Occitanie, 2017, 27 mois, partenaire) ; SUDOE INNOVEC EAU (Sub/Aide Reg. Occitanie, 2016, 36 mois, partenaire) ; ARPE (Sub./Aide Reg. Occitanie, 2016, 36 mois, coordinateur).

## • Rapport Scientifique •

# Introduction

### Contexte

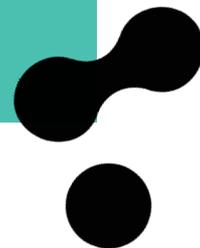
Favoriser, de quelques manières que ce soit, l'intégration de la ressource solaire au sein du triptyque eau-énergie-déchets s'inscrit de fait dans une perspective de développement des écotechnologies solaires. C'est dans ce contexte très général, abordé à notre échelle, que l'ensemble des membres de l'équipe SHPE : les permanents ; les 6 à 8 doctorants et les 1 à 2 post-doctorants ou ATER présents de manière simultanée et régulière au cours de la période d'intérêt ; développent leur activité au sein de l'axe deux « conversion, stockage et transport de l'énergie » du laboratoire PROMES. SHPE apporte également et naturellement sa contribution à l'axe prioritaire numéro 4 « écotechnologies solaires » définissant les objectifs des partenaires du Labex Solstice (2014-2019) renouvelé pour une période de 5 ans à compter de janvier 2020. Plus précisément, la démarche générale adoptée consiste à interconnecter l'utilisation de l'énergie solaire avec la valorisation de déchets (solide ou liquide). Ceci au travers de deux applications que nous avons ciblées dès la création de l'équipe en 2006, objectifs assumés comme appliqués et volontairement associés aux vastes domaines de l'eau et de l'énergie, deux matières premières indispensables au développement de la communauté humaine.

### Objectifs scientifiques

Le premier objectif consiste à valoriser des déchets solides issus de différentes filières industrielles pour un stockage de chaleur haute température (200 à 1000 °C), en particulier adaptés au domaine du solaire concentré. L'intérêt est de proposer des matériaux de stockage innovants, avec des propriétés thermo-physiques proches des céramiques, respectant les principes du développement durable (disponibilité, cycle de vie, ...), mais aussi compétitifs économiquement. Ceci nécessite de mettre en place des voies d'élaboration basées sur la fusion ou le frittage qui tiennent compte de la diversité naturelle de ce type de ressource. Au-delà des aspects matériaux, l'activité sur cette thématique

comprend également une part importante dédiée à des expérimentations de réservoirs de stockage de tailles représentatives (ordre de grandeur de plusieurs centaines de kg). L'objectif est alors de maîtriser la thermique de ces systèmes destinés à fonctionner selon des cycles de charge/décharge et à être intégrés au sein de procédés tels que les centrales solaires à concentration, mais aussi le stockage d'électricité par compression d'air ou encore le stockage de la chaleur fatale disponible en très grande quantité dans différentes filières de l'industrie lourde.

Le second objectif, initié lors de la création de l'équipe SHPE en 2006, consiste à concevoir des procédés d'oxydation avancée basée sur l'utilisation directe du rayonnement solaire. Il s'agit d'améliorer le niveau sanitaire d'effluents liquides avant leur rejet afin d'augmenter leur compatibilité environnementale ou de pouvoir envisager leur réutilisation par exemple à des fins d'irrigation. Ces procédés sont basés sur l'utilisation d'espèces radicalaires hautement réactive directement produite à partir d'énergie solaire. Ils offrent l'opportunité unique de proposer un traitement oxydatif à coût énergétique quasiment nul en très bon accord avec les concepts de chimie verte et de développement durable. Les opérations de détoxification (dépollution/désinfection) peuvent s'opérer en milieu hétérogène ou homogène. Elles demandent : de mettre en place des outils de modélisation pour une bonne compréhension des couplages intervenant au sein des photo-réacteurs entre transfert de masse, transfert radiatif, et cinétique de réaction ; de se doter de moyens expérimentaux fonctionnant sous rayonnement solaire naturel (ordre de grandeur de plusieurs centaines de L); de travailler avec des effluents réels caractérisés par une grande diversité de micro-polluants présents à faibles concentrations ; de prendre en compte la nécessité de développer des moyens de stockage adaptés au travers de l'élaboration de matériaux innovants tels que des composites associant photo-catalyseurs et adsorbant.



# 1. Valorisation de déchets et stockage d'énergie solaire à haute température

## 1.1 Elaboration et caractérisation de céramiques issues de déchets industriels

Les céramiques élaborées à partir de déchets industriels apportent une solution durable à la question du matériau capable d'assurer un stockage par chaleur sensible de grande échelle et susceptible de travailler à des températures allant jusqu'à 1000°C. Ces matériaux innovants apportent une réponse aux problématiques de disponibilité, de coût, de conflit d'usage et de classification engendrés par les forts tonnages nécessaires à mettre en œuvre. Ils trouvent naturellement leur place dans le domaine du solaire à concentration pour lequel une projection de l'AIE fait état à horizon 2050 de la nécessité de disposer de matériaux de stockage à l'échelle de plusieurs dizaines de MT/an. Le domaine de la chaleur fatale industrielle avec un gisement de plus de 4000 TWh/an dans le monde est également directement concerné par des céramiques à bas coûts élaborées à partir de déchets industriels. Déchets amiantés, cendres volantes de centrales à charbon, laitiers de la sidérurgie et tout dernièrement mâchefers d'incinérateurs ont ainsi été envisagés comme matières premières pour l'élaboration de tels matériaux. La voie pétrurgique (Fig. 1) a dans un premier temps été étudiée. Elle se prête particulièrement bien à la mise en forme de pièces moulées favorables au transfert thermique, et ceci tout particulièrement si le sous-produit est disponible à l'état liquide (cas du laitier de la sidérurgie, par exemple).



Figure 1 : Différentes céramiques issues de coproduits inorganiques industriels par voie pétrurgique : plaque plissée (amiante), sphère (cendre volante), cylindre et sphère (laitier). Dimension caractéristique de 3 à 10 cm.

La voie du frittage est aujourd'hui explorée et privilégiée (Fig.2). Elle permet de s'affranchir de contraintes liées au passage à l'état de fusion et d'envisager plus aisément une production de masse par pressage et surtout extrusion (Thèse de N. Lopez-Ferber); technique utilisée dans l'industrie de céramiques par exemple destinée au domaine du bâtiment. Une démarche de formulation consistant à réaliser des mélanges en amont de déchets ou co-produits en vue d'obtenir des céramiques à propriétés spécifiques a été initiée. Dans le cas des cendres volantes avec ajout d'un fondant, le  $\text{CaCO}_3$ ; et de manière plus exhaustive dans le cas des résidus de latérite en Afrique de l'Ouest (thèse de E Kenda). Enfin, l'équipe s'investit récemment sur l'élaboration de céramiques issues de mélanges de déchets inorganiques et organiques. Cette option très innovante ouvre la possibilité d'élaborer des céramiques 100% issues de déchets. Celles-ci sont susceptibles d'être adaptées aux cas nécessitant de fortes puissances (une bonne conductivité) mais aussi une bonne tenue thermomécanique et une forte résistance aux agents oxydants. Nous avons ainsi démontré que l'ajout de coproduits ou déchets organiques permet de former une fraction de phase SiC par thermo-carbo réduction au cours du traitement et ainsi d'obtenir des matériaux à conductivités thermiques, absorptions dans le visible et résistances mécanique et chimique améliorées. Des céramiques Mullite/SiC (70-30%) à partir de cendres volantes et de brais ont été réalisées. Un des objectifs stratégiques dans ce domaine sera la possibilité de réaliser des récepteurs bas coûts et haute température (jusqu'à 1200°C) pour les centrales à tour.



Figure 2 : Production de pellets cylindriques par extrusion/frittage d'un mélange de mâchefer d'incinérateur et d'argiles SD.

Dans tous les cas, l'analyse des phases est effectuée par diffractométrie afin de tenter de générer un lien entre la nature du déchet utilisé, la voie d'élaboration retenue et la composition cristalline de la céramique (Fig. 3). Ce type d'analyse permet également de mieux comprendre les propriétés obtenues en termes de tenue mécanique, stabilité et inertie chimique et tenue en température. La description des phases cristallines est utilement complétée par l'analyse MEB-EDS qui renseigne sur la composition chimique élémentaire. Masse volumique, conductivité thermique, capacité thermique (Fig. 4) sont les grandeurs mesurées. Des méthodes développées en interne complètent les moyens classiques de mesures de ces propriétés thermo-physiques. A titre d'exemple, les outils de caractérisation de la conductivité thermique tels que le laser flash, le conductimètre à barre divisée sont complétés par des bancs de mesure spécifiques permettant de déterminer le comportement de ces matériaux sous sollicitations thermiques diverses : technique de mesure fluxmétrique ; technique du ruban chaud ;.... La technique de mesure fluxmétrique peut ainsi s'avérer particulièrement intéressante pour caractériser les couches de matériaux participant réellement au stockage lors de cycles de charge et de décharge. En fonction des méthodes d'élaboration retenues (fusion, frittage, emploi ou non d'additifs) et du type de déchets, les capacités volumiques se situent à hauteur 2 à 3.5 MJ/m<sup>3</sup>.K pour des conductivités thermiques de l'ordre de 1 à 3 W/m.K. Enfin la compatibilité du fluide de transfert et du matériau de stockage soumis à des conditions proches de leurs futures utilisations (Fig. 5) est une donnée essentielle. Elle est susceptible d'influer à contre temps sur le système. L'incompatibilité des deux éléments principaux du système de stockage peut en effet affecter considérablement l'efficacité du système par une évolution des propriétés thermo-physiques; une augmentation de l'impact économique due à la nécessité de remplacement des matériaux de stockage ; la détérioration des installations. Les essais de compatibilité/vieillessement, essentiels pour une caractérisation de la fiabilité du principe même du stockage, doivent nécessairement se dérouler sur des durées représentatives. Cet aspect est étudié par des essais de vieillissement accéléré sur des montages dédiés.

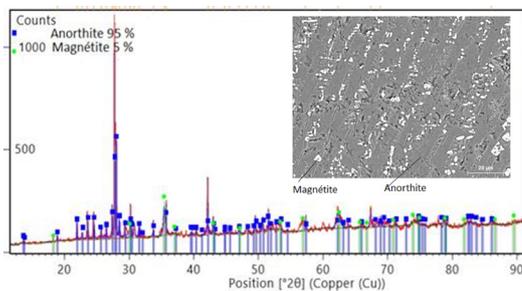


Fig. 3 : Diffractogramme DRX et Micrographie MEB (électrons rétrodiffus.) d'une céramique issue des déchets industriels.

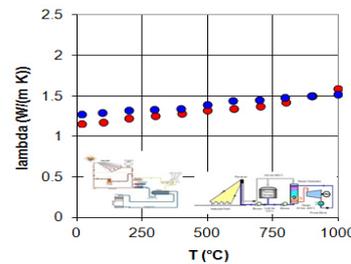


Fig. 4 : Conductivité thermique d'une céramique issue de cendres volantes.



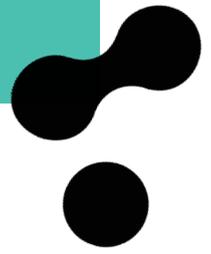
Fig. 5 : Banc de test de compatibilité des céramiques.

## 1.2 Expérimentation et modélisation thermique de stockage thermo-clines hautes températures

Le stockage thermo-cline sur céramiques ou roche naturelle utilise un réservoir unique comprenant une zone de fort gradient thermique (la thermo-cline) qui sépare la zone chaude de la zone froide. Cette zone se déplace axialement dans des directions opposées (circulation du fluide de transfert) lors des phases de charges et de décharges. Ce fonctionnement basé sur un stockage thermique par chaleur sensible permet de restituer l'énergie stockée à une température proche de la température de la charge durant une grande partie de la restitution. Cette caractéristique assure une optimisation de l'efficacité énergétique du stockage dans de nombreuses applications (CSP, valorisation de chaleur fatale industrielle). Mais elle impose de travailler dans les conditions de fonctionnement adaptées qui dépendent des échanges thermiques, conduction - convection - rayonnement, au sein du réservoir. Expérimentalement et toujours à l'échelle de plusieurs centaines de kg de matière, plusieurs couples fluides/solides ont été investigués au regard des grands domaines d'application qui se déclinent essentiellement en niveaux de température (Fig. 6). Couple huiles végétales/roches naturelles (Thèse de J.F. Hoffmann) pour un stockage par thermo-cline de 10 kWh adapté à des cycles ORC qui travaillent à une température maximum de 250°C. Huile synthétique Jarysol/céramique qui répond au besoin de stockage des champs solaires de type cylindro-parabolique qui travaillent jusqu'à 300-400°C (Thèse de T. Fasquelle, stockage de 250 kWh). Air/céramique pour des températures de stockage de 700 à 800°C adaptées aux boucles fluides des centrales à tour, mais aussi à de nombreuses sources de chaleur fatale industrielle (Thèse de N. Lopez-Ferber, stockage de 45 kWh). C'est par ailleurs sur la base de ce dernier prototype réalisé dans le cadre d'une thèse Cifre avec l'entreprise Ecotech Ceram que cette dernière a dimensionné et testé avec succès (Thèse de A. Touzo) un stockage à échelle un de 3 MWh de capacité de stockage.



Figure 6 : de haut en bas : Démonstrateur (hors isolation) 10 kWh de stockage : 500 kg de quartzite, HTF = huile de colza. La cuve thermo-cline de la centrale Microsol-R: 6 T de céramique, HTF = huile synthétique Jarytherm. Vue 3D du stockage air/céramique de 30 kWh et photo de l'intérieur de la veine d'air : 300 kg de céramique, HTF = air à 800°C. Vue extérieure de l'Ecostock échelle 1 réalisé par Ecotech Ceram.



Dans tous les cas les conditions de fonctionnement inhérentes à la création d'une zone thermocline ont été identifiées. Comme attendu, la vitesse de circulation du fluide est l'un des paramètres clés qui conditionnent la taille de la zone thermocline. Des cycles successifs de charges/décharges ont été réalisés mettant en évidence l'évolution de l'efficacité du stockage. La capacité du système à travailler avec une ressource dégradée (débits et des températures d'entrée variables) a également été démontrée. Une démarche de modélisation a systématiquement été associée aux expérimentations. Sous réserve de respecter un nombre de Biot pour les particules de solides suffisamment faible, à l'échelle du réservoir, une approche 1D qui prend en compte les deux phases (fluide et solide) permet de rendre compte de la thermique du réservoir (Fig. 7).

L'évolution des grandeurs locales (profils de température fluide/solide dans le réservoir, température du fluide à la sortie de celui-ci) est correctement représentée. C'est également le cas des grandeurs plus globales qui caractérisent la performance du réservoir comme le taux de charge ou l'efficacité thermique du stockage.

Les outils de modélisation développés permettent également d'estimer les grandeurs nécessaires à une analyse 2nd principe (Thèse de S. Rebouillat), en particulier, d'évaluer non seulement la production d'entropie générée lors d'un cycle de charge/décharge, mais également de préciser quels sont les processus irréversibles (conduction, convection, perte de pression) majoritairement responsables de cette production d'entropie, et donc sur lesquels il faut porter les efforts de R&D. La méthodologie développée a été récemment appliquée à plusieurs cas d'étude, et a permis d'évaluer pour chaque cas, les diamètre et hauteur de la cuve et la taille des grains conduisant au minimum de production d'entropie. L'étape suivante consistera à coupler cette analyse avec celles du champ solaire, et du convertisseur (groupe de puissance, groupe froid, groupe de dessalement, etc.), qui ont été développées ou sont en cours de développement en liaison avec d'autres équipes (TRECS, TES, PPCM), rendant l'optimisation globale du système solaire de conversion possible. Enfin et très récemment, une approche multicritère permettant de caractériser la qualité du système de stockage est en cours d'élaboration (Thèse de D. Leroux). Elle a pour ambition, à terme, d'être basée sur la performance thermique du réservoir, la prise en compte de bilans entropiques, des critères technico-économiques et, sur le volet environnemental, des indicateurs issus des méthodes ACV.

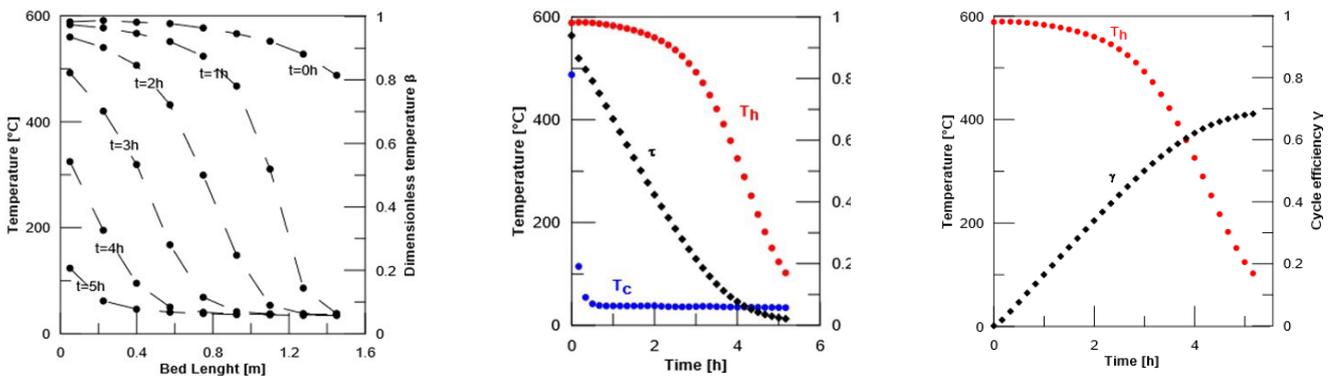


Figure 7 : Exemple de comportement thermique du stockage thermocline air/céramique de 30 kWh. Phase de déstockage. (gauche) Profils de température. (milieu) Température d'entrée (T<sub>c</sub>), de sortie (T<sub>h</sub>) de l'air, et taux de charge (τ). (droite) efficacité du cycle de charge/décharge.

## 2. Oxydation avancée par voie solaire pour la détoxification d'effluents

### 2.1 Matériaux et réacteurs pour oxydation avancée par voie solaire

Comme tout procédé basé sur l'utilisation directe de l'énergie solaire, une fonctionnalité de stockage doit être pensée et adaptée au traitement d'effluents par oxydation avancée (POA) par voie solaire. Ceci afin de fiabiliser le fonctionnement. Dans cet esprit, le couplage d'un traitement de type oxydation avancée avec les procédés de sorption, constitue une voie privilégiée. Il permet d'associer très efficacement les fortes capacités d'adsorption/séparation de polluants (mais aussi d'agents pathogènes) sur colonne d'adsorbant à un traitement de la pollution par oxydation (au cours de périodes d'ensoleillement favorables) différé dans le temps et éventuellement dissocié dans l'espace. Cette hybridation a été étudiée dans le cas des POAs hétérogènes qui reposent sur la photo-activation d'un catalyseur solide (le  $\text{TiO}_2$ ) utilisé sous la forme d'une suspension de particule. Une première option avait été investiguée dans le cadre d'une collaboration avec la société Véolia.

Appliqué au cas très concret d'une production d'eau potable à partir d'une nappe phréatique polluée au perchloroéthylène, le procédé se décline selon trois étapes distinctes : adsorption/séparation du polluant sur colonne de charbon actif ; régénération thermique de l'adsorbant à partir d'énergie solaire ; minéralisation des condensats issus de la régénération par photocatalyse solaire. Mais l'association oxydation-sorption peut également et avantageusement être abordée à l'échelle de la particule d'adsorbant. Ceci suppose de développer des méthodes d'élaboration de composites  $\text{AC}/\text{TiO}_2$  efficaces qui conservent le pouvoir adsorbant du charbon actif et la photo-activité du catalyseur  $\text{TiO}_2$ . Une telle association permet d'envisager un processus de régénération in situ en jouant sur la réversibilité de l'équilibre entre les phases liquides et adsorbées. Une première série de composites issus d'une collaboration avec le LCMN de l'Université Caddi Ayad, et le Cirimat de Toulouse (Prog. Toubkal) a été testée avec des nano-composites synthétisés par nos partenaires par voie sèche, via l'association d'argiles naturelles au sulfate de titane utilisé comme précurseur moléculaire de  $\text{TiO}_2$ . Une seconde série

de composites a été synthétisée dans le cadre d'un doctorat effectué en co-tutelle avec le 2iE du Burkina Fasso (Thèse de C. Telegang). Dans ce dernier cas, l'adsorbant a été élaboré à partir de biomasses disponibles localement (bois d'eucalyptus ou de karité), puis associé par coating avec un sol de titane disponible commercialement. Ce matériau permet de développer les propriétés absorbantes classiques des charbons actifs tout en présentant une fonctionnalité de minéralisation du polluant. Les résultats obtenus ont par ailleurs validé le principe d'une régénération effective du matériau adsorbant lorsque le processus photo-catalytique est activé (Fig. 8).

Suite à cette première étape de démonstration de la réalité et de l'intérêt du couplage oxydation sorption nous avons utilisé la mécano-synthèse comme méthode originale afin de créer des composites  $\text{AC}/\text{TiO}_2$  (Thèse de E. Ribeiro). Cette méthode mise en œuvre dans l'industrie pour associer des poudres solides est basée sur l'utilisation de broyeurs à boulets planétaire. La taille et la composition des billes de broyage, le rapport masse des billes/masse des poudres, la vitesse de rotation du bol de broyage, la durée du broyage qui peut être continu ou intermittent constituent l'ensemble des conditions opératoires qui ont été étudiées puis déterminées pour assurer des conditions favorables à l'élaboration de composites. Ceux-ci sont ensuite caractérisés en termes de MEB, analyse chimique type EDS, structure cristalline par DRX, microtexture par BET, et granulométrie par méthode laser (Malvern) et/ou analyse d'image. L'ensemble de ces caractérisations renseigne sur la population de particules de composites et apporte également une meilleure compréhension de l'effet de mécanosynthèse en fonction des paramètres de broyage choisis. Un résultat marquant, à titre d'exemple, concerne la cristallinité et la composition de la phase  $\text{TiO}_2$ . Celle-ci peut être fortement altérée par le broyage intensif, conduisant à un passage de la phase anatase vers la phase rutile accompagné d'une forte baisse de la réactivité. Ce verrou est levé en adoptant un schéma de broyage intermittent. La finalité de l'ensemble de ces développements est de moduler les propriétés fonctionnelles spécifiques selon les applications visées à savoir une grande capacité de stockage, de régénération ou/et de photodégradation.

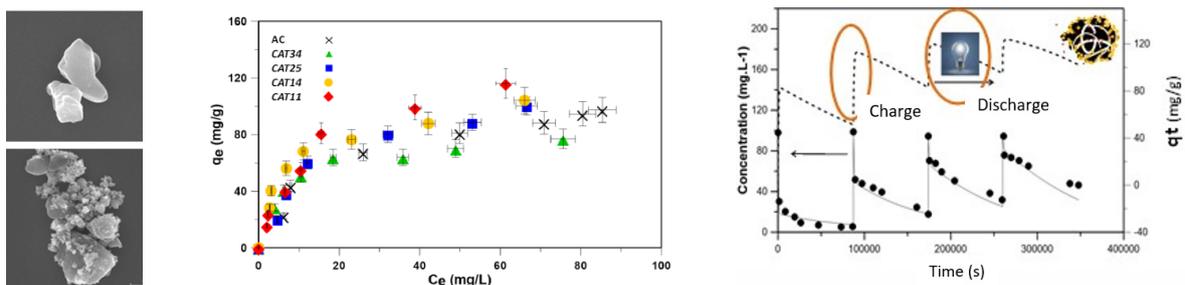


Figure 8 : De gauche à droite : Vue au MEB de particules de AC et composite  $\text{AC}/\text{TiO}_2$  après 10 h de mécano-broyage (grossissement 500  $\mu\text{m}$ ) ; Isothermes d'adsorption de phénol de composites à différents taux de AC ; cycle de charge/décharge de phénol sur composite  $\text{AC}/\text{TiO}_2$  (préparation par coating).

A cette démarche matériau est associée une approche de modélisation dont l'objectif consiste à proposer un modèle complet de simulation de photoréacteurs basé sur l'utilisation de composites CA/TiO<sub>2</sub> sous la forme de particules en suspension, ou, à terme, sous forme supportée (Thèse de C. Dezani). Ceci afin de pouvoir optimiser l'utilisation de ces matériaux pour des applications solaires pour lesquelles la ressource est par nature fortement discontinue. Cet objectif impose en premier lieu de traiter la question des transferts par rayonnement en milieu hétérogène, modélisation loin d'être triviale. Ceci a été abordé au travers d'une collaboration en interne avec C. Calliot, chercheur de Promes (jusqu'à septembre 2019) qui développe des outils numériques pour la résolution des bilans radiatifs par la méthode de Monté Carlo. Ils ont été appliqués (dans un premier temps) au cas d'un transfert monodimensionnel dans une suspension de particules de simple TiO<sub>2</sub> parfaitement agitée dans un réacteur plan irradié en face avant (Fig.9). La connaissance de la vitesse volumétrique locale d'adsorption (LVRAP) associée au formalisme d'une loi cinétique permet le calcul des vitesses locales de dégradation des molécules d'intérêts. La vitesse moyenne à l'échelle du réacteur est obtenue par intégration volumique. Confrontée aux résultats expérimentaux avec succès cette démarche doit à présent être étendue au cas des composites.

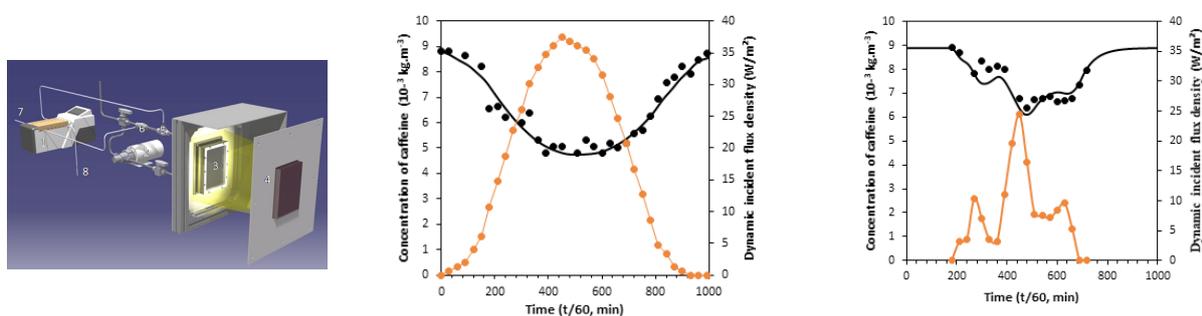


Figure 9 : Schéma CAO du montage d'un réacteur parfaitement agité (2 cm d'épaisseur) irradié par un panneau de LED et fonctionnant en boucle ouverte. Profils de concentrations expérimentaux et simulés (traits pleins) d'une molécule test (caféine) pour un profil d'irradiations type d'une journée d'été ou d'une journée d'hiver avec couverture nuageuse (cas d'une suspension de TiO<sub>2</sub>).

## 2.2 Oxydation d'effluents réels sous rayonnement solaire naturel

De manière préliminaire et juste en amont de la période d'intérêt, une première étape, débutée sur des photo-réacteurs à l'échelle d'une quinzaine de litres, a consisté à effectuer le suivi d'un perturbateur endocrinien spécifique, utilisé comme marqueur de pollution, au sein d'effluents collectés à la sortie liquide d'une station d'épuration. Toujours à l'échelle de quelques litres, le suivi de plus de 60  $\mu$ -polluants présents dans les effluents de STEP et regroupés selon leur appartenance à une famille (antibiotique, antidépresseurs, anti-inflammatoire, produits hormonaux, pesticides, ...) a démontré leur disparition ou leur très nette diminution après quelques heures de traitement oxydatif sous irradiation solaire. Ces premiers essais ont également permis d'étendre le domaine d'expertise de l'équipe aux procédés d'oxydation avancée en phase homogène de type photofenton (Thèse de M. Brienza) avec le persulfate comme oxydant primaire. Les aspects de désinfection ont également été abordés dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire de Biotechnologie Environnementale (LBE - INRA-Narbonne). L'inactivation de bactéries de type E Coli a démontré le potentiel de ces traitements pour la désinfection (Thèse M. Kacem). C'est dans le cadre de deux projets Sudoe Interreg (Innovac Eau en partenariat avec l'UPVD et 4KETs4ReUse en convention avec l'IRD) que nous avons conçu et dimensionné des installations travaillant à l'échelle du m<sup>3</sup>/jour (Fig. 10). Trois prototypes positionnés sur une plate-forme d'essais dédiée permettent aujourd'hui de tester trois modes d'oxydation avancée. Les photo-réacteurs sont alimentés par des effluents (convention avec Véolia) stockés et conditionnés au niveau d'une station d'alimentation. Celle-ci assure un contrôle des débits, des volumes injectés, et si nécessaire des compositions en micropolluants émergents tels que les pesticides ou les résidus médicamenteux identifiés au travers de plusieurs directives européennes comme problématiques vis-à-vis de l'environnement et/ou de la santé humaine.



Figure 10 : Les trois prototypes solaires et la station d'alimentation positionnés sur la dalle extérieure du laboratoire Promes.

La photo-activation du catalyseur solide  $\text{TiO}_2$  sous différentes mises en forme (Aeroperl®, Photosphère®, catalyseur supporté en cours de développement...) a été ainsi étudiée avec notamment comme objectif l'amélioration de la biodégradabilité des résidus pharmaceutiques issus d'établissements spécialisés (type maison de retraite) initialement présents dans les effluents pour un traitement par recirculation dans les bassins de boue activée. Trois micro-polluants cibles (ibuprofène, diclofénac, carbamazépine), issus d'un traitement biologique, ont été sélectionnés pour leur résistance à la dégradation biologique et leur toxicité. Les essais réalisés sur un photoréacteur solaire travaillant avec des photosphères de  $\text{TiO}_2$  démontrent une photo-oxydation efficace et rapide sous conditions dites réelles (matrice complexe et irradiation naturelle). Cette étude fait également ressortir l'impact des conditions de fonctionnement sur la vitesse de traitement. Par exemple une matrice complexe versus eau versus l'eau du réseau, la présence de plusieurs composés compétiteurs (effet cocktail), un niveau élevé de concentration en micro-polluants sont autant de facteurs qui tendent à limiter les performances du photoréacteur. La photo-activation du persulfate à pH neutre à partir d'agents complexant des ions ferreux est également étudiée. Elle permettra à terme de lever le verrou lié à la nécessité de travailler à pH acide pour éviter la précipitation des ions ferriques. L'activation thermique du persulfate est également explorée (Fig. 11). Basée sur l'association de capteurs thermiques plans à un système de récupération de chaleur, ce procédé, simple de mise en œuvre, conduit à un traitement efficace en minimisant la surface de capteur installée. Cette dernière option a conduit au dépôt d'un brevet et à la mise en place d'un programme de pré-maturation avec la SATT AXLR de Montpellier. Celui-ci a pour objet de tester la capacité du procédé à éliminer les quatre agents pathogènes (*Escherichia coli*, entérocoques fécaux, spores de bactéries sulfitoréductrices, phages ARN spécifiques) retenus aujourd'hui comme marqueurs de l'état sanitaire d'un effluent destiné à de l'irrigation. Le résultat aujourd'hui acquis est la capacité des POAs à traiter des micro-polluants organiques à l'échelle de quelques  $\text{m}^3$  en travaillant avec des surfaces irradiées de l'ordre de la dizaine de  $\text{m}^2$ . Ces installations qui sont destinées à être pérennes et évolutives de manière à approcher par itérations successives des procédés adaptés à des conditions d'utilisation sur sites. Ces pilotes solaires ont ainsi pour vocation de permettre d'effectuer des avancées à visée très concrètes telles que la mise en place de méthodes de contrôle/régulation par le suivi du pouvoir oxydant de la solution dans le cas des processus homogènes; le test de différentes options de séparation des particules de l'effluent traité pour les processus homogènes; l'établissement de corrélations visant pour des gammes d'effluents à générer un lien entre l'énergie radiante reçue et l'avancement de la minéralisation et/ou le niveau de toxicité;... Avancées qui conditionnent véritablement les possibilités de dissémination de ces procédés en dehors du cadre strict d'un laboratoire de recherche.

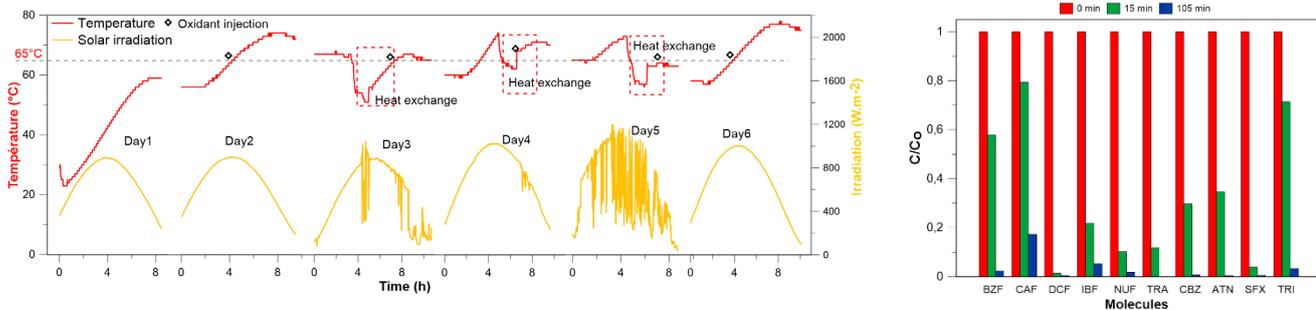


Figure 11 : Exemple de traitements successifs de 800 L d'effluent de STEP par oxydation par activation thermique (6  $\text{m}^2$  de surface de capteurs). Profil d'irradiation et profil de température. Résultats d'analyses sur une dizaine de micro-polluants (benzafibrate, caféine, diclofénac, ibuprofène,...), résultats reproductibles après chaque injection de persulfate (représentée par les losanges sur la figure de gauche).

## Présentation de l'équipe

Responsables : D. Stitou (IRHC CNRS) jusqu'au 31 juillet 2019; D. Aussel (PR1 UPVD) à partir du 1er août 2019

Permanents : S. Mauran (PR2 UPVD – départ à la retraite en 08/2019), N. Mazet (DR1 CNRS), M. Perier-Muzet (MdC UPVD – recruté 09/2017), P. Vilamajo (PR Certifié), G. Hernandez (AI, 50%, jusque 09/2017).

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : M. Pistek (03/2015), R. Gupta (10/2014), A. Sultana (10/2015), M. Ramos (11/2016), D. Tsuanyo (06/2015), G. Boulnois (04/2016), Ugo Pelay (07/2017), R. Borgogno (04/2017), A. Pubill (11/2017), J. Fito De la Cruz (10/2017), L. Von Niederhausen (03/2019); (2) thèses en cours : A. Svensson (10/2015), S. Cheikh (10/2015), F. Ferrucci (02/2016), C. Lacroix (10/2016), P. Kesarwani (05/2016), A. Godefroy (10/2017), C. Van Kien (10/2017), L. N. Thanh Cong (09/2018), M. Dahmani (10/2018), A. Idir (02/2019), A. Perrigot (09/2019),

Post doctorant : B. Guillaume

Mots clés

Sorption Solide/gaz - Transferts couplés chaleur / masse - Conversion thermohydraulique - Modélisation dynamique de procédés - Analyse thermodynamique - Optimisation et modèles économiques de l'Énergie

Références

4, 5, 6, 7, 27, 49, 51, 56, 60, 61, 66, 75, 76, 77, 78, 91, 129, 130, 137, 140, 162, 186, 187, 208, 229, 240, 241, 247, 258, 267, 273, 274, 277, 278, 281, 319, 393, 394, 442, 449, 471, 484, 485, 491, 494, 505, 506, 507, 508, 509, 513, 519, 521, 522, 552, 553, 560, 566, 611, 618, 640, 645, 651, 653, 690, 721.

### THÈMES

1. Stockage d'énergie thermique par procédé thermochimique
2. Conversion d'énergie thermique par hybridation de procédés thermochimiques
3. Conversion chaleur basse température / travail par procédé thermo-hydraulique
4. Optimisation et Modèles économiques pour l'Énergie

### COLLABORATIONS

#### Collaborations nationales

N. Le Pierrès (LOCIE, Univ. Savoie, Aix les Bains), L. Luo (LTN, Nantes), JP Bedecarat (LaTEP, Pau), F. Lucas (PIMENT -La Réunion), M Pons (LIMSI, Orsay), P. Papillon (CEA INES, Le Bourget du Lac), F. Kuznik (CETHIL, Lyon), P. Ortega (GEPASUD, Univ. Polynésie Française), M. Boix, S. Domenech, L. Montastruc (ENSIACET,

Toulouse), P. Bendotti (EDF R&D, Clamart, Daniel Hissel (FCLab).

#### Collaborations internationales

Univ. Pacifico, Lima, (Pérou), IMCA, Lima, (Pérou), IIT Delhi (Inde), IIT Kanpur, (Inde), IMPA, Rio de Janeiro, (Brésil), Acad. des sciences, Prague, (Rép. tchèque), Univ. Diego Portales, Santiago, (Chili), Acad. des sciences, Prague, (Rép. tchèque), CMM, Santiago, (Chili), RMIT, (Australie), ZIE, Ouagadougou, (Burkina-Faso), MIT, (USA), Univ. Sapienza, Rome, (Italie), IIT Madras, (Inde), Crever, Tarragona, (Espagne), Univ. Constantine, (Algérie), Univ Djillali Liabes- Sidi Bel Abbès, (Algérie).

#### CONTRATS

Projet IN-STORES (Coordinateur, ANR, 02/2013 - 07/2017) ; Projet IROE de la

Fondation PGMO (09/2012 -08/2015); Contrat Coldway SA /CNRS adossé à convention CIFRE A. Pubill (03/2014 - 03/2017); Contrat Industriel CREMHYG (2015); Projet DACSOL de maturation SATT AxLR / Coldway SA / CNRS (05/2014 - 09/2016); Projet TRIGETHYSOL- Maturation SATT AxLR / CNRS (09/2014-11/2016); Projet DEPOTHS - Pré-maturation SATT / CNRS (01/2015 - 07/2015) ; Contrat ENERNET (Cellule Énergie CNRS INIS, 2013-2014); Projet DEPOTHS2 de maturation SATT / CNRS (01/2019 - 01/2021); Projet Bilatéral PHC TASSILI 2019 - Franco-Algérien (09/2018-09/2021) ; Projet H2020 – MINISTOR (11/2019 - 04/2024); Projet ANR - RECIF (11/2018-12/2022); Projet Industriel TOTAL (02/2019 - 01/2022) avec convention CIFRE (Thèse A. IDIR)

- en bref -



## • Rapport Scientifique •

# Introduction

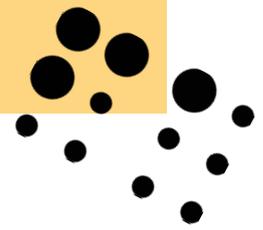
### Contexte

L'équipe Thermodynamique, Énergétique et Systèmes Réactifs (TES), basée sur le site de Perpignan, est composée de 4 enseignant-chercheurs UPVD dont 1 parti en retraite en 2019 et 1 MCF recruté en 2017, 2 chercheurs CNRS (1 IRHC, 1 DR1) et 1 technicien (AI CNRS) partagé à 50% jusqu'en 2017 avec l'équipe SHPE. 4 permanents sont HDR. Les activités de recherche de l'équipe ont été soutenues par 3 projets ANR, 5 projets de coopération internationale, 1 projet CNRS INSIS, 4 contrats industriels, 4 projets maturation SATT. Ce soutien a financé l'accueil de 20 doctorants, 10 chercheurs invités, 8 post-Docs (dont 4 étrangers) et 9 Masters.

Les activités de recherche de l'équipe TES (Thermodynamique, Énergétique et Systèmes réactifs) portent sur le développement de procédés à finalité énergétique, les procédés thermo-chimiques et thermo-hydrauliques, dont la spécificité est d'exploiter la thermicité de transformations physico-chimiques monovariantes couplées : changements d'état liquide/vapeur ou réactions chimiques. De tels procédés permettent d'exploiter et valoriser une source thermique, en particulier d'origine solaire, pour la production et le stockage de froid ou de chaleur dans une large gamme de températures (-30°C à 600°C), la production de travail convertible en électricité ou le dessalement par osmose inverse. Nos travaux s'inscrivent dans une logique d'exploitation des énergies renouvelables ou de chaleur fatale, de recherche de solutions innovantes pour minimiser l'impact environnemental et la consommation énergétique des différents secteurs d'activité (bâtiment, industries, productions d'énergie...). Les aspects d'optimisation économique des procédés énergétiques constituent un autre axe fort de l'équipe.

L'équipe TES développe des recherches répondant à des enjeux sociétaux et environnementaux importants et ouvrant de nouvelles problématiques scientifiques :

- La valorisation de chaleur BT (solaire ou de chaleur fatale), son stockage de longue durée (à l'échelle saisonnière) ou sa conversion à forte valeur ajoutée en froid, en travail ou en électricité, sont un défi et un enjeu énergétique important pour le bâtiment.
- Le stockage de chaleur à HT est un atout considérable de la filière CSP car il permet des stratégies de fonctionnement conduisant à une réduction du coût de l'électricité produite. Les procédés thermo-chimiques peuvent apporter une solution nouvelle à cette problématique par leurs qualités intrinsèques : densité énergétique élevée et mode opératoire contrôlable.
- La production de froid à haute efficacité à partir d'énergie mécanique est actuellement un enjeu majeur pour les systèmes embarqués. Les cycles thermo-hydrauliques, par leurs fortes efficacités énergétiques potentielles, constituent une solution alternative aux systèmes classiques.
- D'autres part, les problématiques cruciales liant eau et énergie telles que le dessalement d'eaux de mer ou saumâtres (Fiche 3 peuvent également être avantageusement traitées par des procédés thermo-hydrauliques délivrant un travail directement utile pour l'application sans transformation électrique.
- Enfin, la dérégulation récente des marchés de l'électricité dans de nombreux pays européens a créé une forte demande de modélisation et de calcul. Les modèles développés reposent sur l'analyse variationnelle et la résolution de problèmes d'optimisation bi-niveaux complexes. Le développement de tels modèles doit permettre de proposer un dimensionnement optimal, au sens économique, du système à l'échelle du procédé mais aussi l'analyse des marchés de l'électricité.



### Objectifs

Ils sont centrés sur:

- La modélisation à des niveaux d'échelle et de précision pertinents de systèmes hors équilibre et instationnaires couplant différents composants transférant entre eux des extensités : masse, chaleur (par conduction, convection ou rayonnement) et travail;
- La maîtrise des limitations par transfert de ces extensités dans des procédés thermochimiques par des configurations de composants adaptées (réseau de diffuseurs de vapeur, échangeurs de chaleur), ou la mise en œuvre de milieu poreux réactif performante;
- La conception de procédés énergétiques, basé sur différentes associations de composants et prenant en compte les contraintes thermodynamiques (températures des sources et puits de chaleur disponibles, pression);
- L'optimisation dans les modèles d'échange d'énergie (marchés) et des procédés sous contraintes (densité énergétique, puissance volumique ou massique, critères environnementaux,) ou de réseaux énergétiques (écoparcs industriels), ainsi que leur analyse par le biais de l'analyse mathématique d'indicateurs pertinents de performances thermodynamiques ou économiques.

## 1. Stockage d'énergie thermique par procédé thermochimique

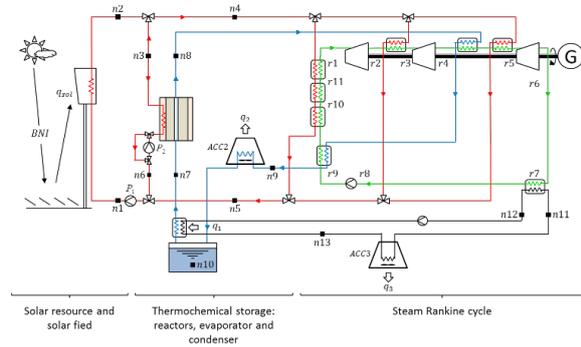
### 1.1 Stockage de chaleur solaire HT pour cycle de puissance

Le stockage thermique haute température (200-1000°C) est un enjeu énergétique important pour un grand nombre d'applications (industrie, énergie solaire concentrée) et un défi en raison du faible nombre de matériaux résistant à ces conditions. Les procédés thermochimiques sont pertinents car il existe des réactifs (hydroxydes, carbonates) simples, acceptables (en sécurité, environnement) et de faible coût. Pour les centrales CSP, le couple réactif  $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$  est prometteur par son fonctionnement entre 400 et 600°C et sa densité énergétique intrinsèque jusqu'à 1000 kWh/m<sup>3</sup> de solide. Cette problématique a été au cœur du projet InSTORES, dont l'ambition est d'aborder l'ensemble des échelles, depuis la caractérisation de composites réactifs et de réacteurs, jusqu'à l'optimisation globale des performances de la centrale intégrant ce stockage ainsi que des scénarios de stockage/production innovants pouvant y être associés :

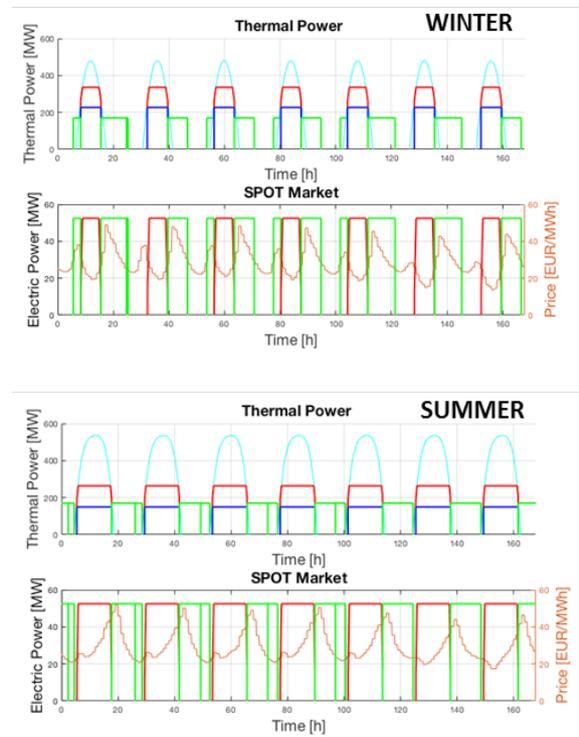
- le réacteur thermochimique : les expérimentations ont permis de déterminer les performances du lit en puissance globale et spécifique et l'influence de paramètres de mise en œuvre (densité énergétique, densité de graphite) et opératoires (écart à l'équilibre thermodynamique) en déstockage. Ces puissances peuvent atteindre 200 kW/m<sup>3</sup>. L'ajout de graphite, même dans une gamme limitée afin de ne pas pénaliser la densité, améliore les performances. Les durées de déstockage de 1h à 12h, sont compatibles avec des scénarios allant de la production de pointe (~3h) jusqu'à celle de base pour une CSP intégrant un tel stockage.

- L'intégration du stockage thermique et du cycle de Rankine : des configurations innovantes maximisant les performances globales d'une telle centrale CSP ont été inventoriées. Elles couplent ces deux systèmes soit par voie massique (via le fluide de travail) soit par voie thermique (récupération de chaleur entre composants exo- et endothermiques de chaque cycle). Selon les intégrations, les performances évoluent jusqu'à +15% pour le rendement, et -18% pour la chaleur à évacuer au milieu ambiant (par rapport à la configuration de base). Ainsi, une intégration pertinente du stockage thermochimique permet non seulement de bénéficier d'une production d'électricité hors ensoleillement, mais aussi d'améliorer les performances énergétiques de la centrale, à la fois en phase
- Optimisation économique de centrale solaire intégrant un stockage thermochimique : L'objectif original de cette étude est l'optimisation simultanées des scénarios de stockage/déstockage/ production de la centrale et du stockage thermochimique associé (caractéristiques physiques, capacité, conditions opératoires), dans le cadre du marché de l'électricité (Spot) et de ses variations selon les heures, jours, saisons. Les scénarios visent donc une production d'électricité dans les périodes de fortes demandes donc de prix élevés de l'électricité. Le critère d'optimisation incluant les revenus de la centrale sur sa durée de vie et les coûts de fonctionnement et d'investissement est le Net Present Value (NPV). Cette optimisation conduit à des scénarios originaux, impliquant une à deux phases de décharge en fonction du jour (jour ouvrable ou week-end) et de la saison. Ces scénarios dépendent aussi de la taille du champ solaire (SM=1.5 à 3) et de la localisation.

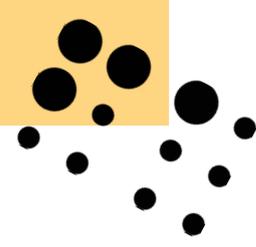
Les résultats économiques sont pour l'instant mitigés. Les revenus augmentent considérablement grâce au stockage et sont plus élevés que pour le scénario classique (un seul déstockage au coucher du soleil). Néanmoins, ces revenus sur sa durée de vie de la centrale ne compensent pas les coûts d'investissement et opératoires, et, dans les conditions de l'étude, ces centrales nécessitent des subventions. Mais cet outil ouvre la possibilité d'études plus larges : sensibilité des résultats financiers à des hypothèses de variations plus importantes des prix de l'électricité dans le futur, aux coûts très évolutifs des composants d'un CSP, etc, planification de stockage sur plusieurs jours, jusqu'à un stockage entre saisons.



Exemple de schéma de principe de la centrale avec stockage thermochimique, incluant les intégrations thermiques : En stockage : du gaz réactif (désurchauffe, condensation, n8-n9) vers le Rankine (préchauffe, surchauffe, r4, r9) ; En déstockage : du Rankine (condenseur, r7) vers le stockage (évaporateur ; n12-13).des observations atmosphériques (PSI 3).



Light blue: maximal solar energy available from solar field. Dark blue: energy absorbed by the thermochemical system during its storage phase. Area limited by red line and higher dark blue line: solar energy consumed by the power block. Green: thermal energy provided by the storage system to the power block during discharge phases - Scenarios optimisés de fonctionnement de la centrale solaire, sur une semaine en hiver (à gauche) et été (à droite) (1er jour de semaine : lundi) . Cas du site de Daggett, Californie. Multiple solaire SM=2.5, puissance nominale du Rankine : 50 MWe



## 1.2 Stockage intersaisonnier de chaleur solaire BT pour l'habitat

L'objectif est de maximiser la fraction solaire de couverture des besoins de l'habitat en mettant en œuvre un stockage de chaleur intersaisonnier. Par sa capacité à stocker sans perte au cours du temps, les procédés thermochimiques sont bien adaptés à cet objectif. Le couple  $\text{SrBr}_2 \cdot 2/6\text{H}_2\text{O}$  est sélectionné pour ces conditions opératoires ( $T_h < 80^\circ\text{C}$ ). Ce stockage thermochimique intersaisonnier a été abordé à 2 échelles: le milieu poreux réactif de forte densité sur un banc de caractérisation dédié; et un prototype de réacteur de taille significative (500kg de réactif, en 8 modules, 388 kWh/m<sup>3</sup> de lit et une dissymétrie d'évolution entre ces bornes (linéaire en décomposition et en 1/X en synthèse). Ainsi, la perméabilité a été caractérisée pour des milieux de densités énergétiques jusqu'à 600 kWh/m<sup>3</sup>. On observe une diminution importante de la perméabilité entre les états déshydraté et hydraté (de 1 à 2 ordres de grandeur, liée à la forte stœchiométrie de ces réactifs), Cette évolution, confirmée sur le prototype, montre l'attention à porter sur la phase d'hydratation dès son début pour la maîtrise la limitation massique. Compte tenu des très faibles pressions de vapeur d'eau aux températures envisagées, le prototype a été conçu pour opérer sous flux d'air humide, pour des raisons de simplification de fabrication et de coût du procédé réel.

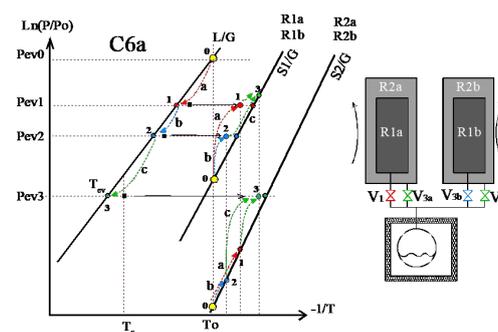


Réacteur thermochimique pour le stockage intersaisonnier de chaleur solaire

Une modélisation couplant transferts et cinétique chimique a montré que, malgré des limitations différentes (thermique sous vapeur pure et massique sous air humide), le fonctionnement sous air humide permet d'atteindre des puissances spécifiques en déstockage compatible avec la demande de l'habitat. Les facteurs principaux pour contrôler cette puissance et l'adapter à la demande ont été identifiés: l'écart à la température de l'équilibre thermodynamique du réactif et le débit massique du flux d'air humide. Cependant, la température utile (en sortie du réacteur en déstockage) ne dépend pas du flux d'air mais uniquement des conditions d'entrée (T, humidité). Il s'avère donc indispensable de contrôler précisément ces conditions. Globalement, ce projet a démontré la faisabilité d'un tel stockage thermochimique.

## 1.3 Stockage de froid pour application transport à température négative

En France, la chaîne du froid assure l'approvisionnement de plus de la moitié des denrées alimentaires et sanitaires. La maîtrise de cette chaîne du froid constitue donc un enjeu majeur de santé publique et de sécurité sanitaire. Les systèmes actuels, basés sur des machines à compression mécanique de vapeur, ou sur l'usage de matériau à changement de phase ont des difficultés, voire sont incapables, d'assurer les deux fonctions majeures requises: la mise en température rapide du caisson avant le chargement des denrées et assurer la production de froid même lorsque le moteur du véhicule est arrêté, c'est-à-dire sans possibilité d'utiliser aucune source d'énergie. Dans le cadre d'un partenariat CIFRE avec la société Coldway (thèse A. Pubill), qui propose actuellement des équipements de stockage thermochimique de froid positif pour le transport à température dirigée, un double objectif est visé: il s'agit de développer un procédé thermochimique permettant d'une part une production de froid de forte puissance instantanée afin de d'obtenir une mise en température rapide du container, et d'autre part son maintien en température sur une longue durée (de l'ordre de la dizaine d'heures) et en particulier lorsque le moteur du véhicule est arrêté. Un tel procédé, dans sa version de base, est constitué de deux éléments couplés via le gaz réactif: un évaporateur/condenseur siège d'un changement d'état liquide/gaz, et un réacteur ou un ensemble de réacteur dans lequel est confiné le matériau réactif poreux qui absorbe ou désorbe le gaz actif par réaction chimique renversible avec des effets respectivement exo- ou endothermiques.



Représentation schématique dans le diagramme de Clausius-Clapeyron d'une configuration de procédé thermochimique impliquant deux ensembles de réacteurs imbriqués et de leur gestion temporelle pour la production de froid de forte puissance à très basse température ( $-40^\circ\text{C}$ )

Plusieurs voies originales sont ici explorées pour l'obtention de fortes puissances frigorifiques à basse température. Un tel procédé thermochimique, répondant à cette finalité énergétique, implique d'intervenir à différents niveaux de la conception du procédé et prendre notamment en compte les interactions existantes à diverses échelles allant du matériau jusqu'au procédé : le choix des réactifs et de leur mise en œuvre, les contraintes opératoires appliquées, le protocole de gestion du ou de plusieurs réacteurs, le dimensionnement du réacteur (épaisseur de couche réactive, surfaces d'échanges, diffuseurs de gaz,...) impliquant des problématiques scientifiques liées aux transferts de chaleur à forte densité de flux, de masse à basse pression les deux étant couplés à une cinétique chimique, et enfin la gestion dynamique du réacteur thermochimique au cours d'un cycle de fonctionnement du procédé. Une modélisation globale du réacteur et du procédé dans son ensemble est actuellement en cours de développement pour permettre le dimensionnement des différents composants impliquant la gestion énergétique de plusieurs réacteurs thermochimiques.

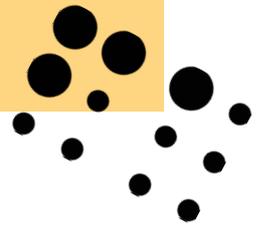
#### 1.4 Production de froid solaire par procédé thermochimique

La valorisation de chaleur basse température, en particulier la transformation de l'énergie solaire thermique en froid, est également un enjeu énergétique important. Le projet de maturation DACSOL, financé par la SATT AxLR, vise à démontrer la faisabilité et l'intérêt technico-économique d'un procédé thermochimique permettant de produire du froid de manière totalement autonome sur des sites isolés en utilisant uniquement de l'énergie solaire thermique, notamment pour la production de glace, la conservation de produits denrées thermosensibles, la climatisation de bâtiments ou locaux techniques isolés. Ce procédé thermochimique utilise un sel réactif, typiquement du chlorure de calcium ou de baryum, qui réagit chimiquement avec l'ammoniac dans un réacteur exposé au soleil le jour et refroidi naturellement la nuit. Son fonctionnement comporte deux phases principales : une phase diurne de régénération du système durant laquelle le réacteur chauffé par le soleil est connecté au condenseur où est condensé l'ammoniac gazeux produit par le réacteur, puis une seconde phase nocturne de production de froid durant laquelle le réacteur refroidi à la température ambiante est connecté à l'évaporateur où est produit le froid par évaporation de l'ammoniac liquide.



Dispositif solaire de production autonome de froid actuellement en cours de test pour le maintien à 25°C d'abri technique de relais Telecom opérant en zone chaude désertique

L'une des applications visées dans le projet DACSOL est la climatisation autonome de stations de télécommunication (relais GSM) isolés en zone désertique ou non desservis par le réseau électrique. En effet, de 30 à 50% de l'énergie électrique consommée par les relais de télécommunication est utilisée pour assurer la sécurité thermique du local et éviter des avaries du relais dues à un fonctionnement dans une ambiance trop chaude. A l'heure actuelle, les systèmes de climatisation solaire par voie thermochimique ne sont pas encore commercialisés bien qu'ils présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes concurrentiels de climatisation photovoltaïque : pas de perte de performance dans le temps ni avec la température extérieure, système complètement silencieux, utilisation de fluides non polluant n'ayant pas d'impact sur la couche d'ozone ou le réchauffement climatique, maintenance très réduite et grande fiabilité (pas de pièces en mouvement), fonctionnement sans consommable, autonome et entièrement autorégulé par les conditions extérieures.



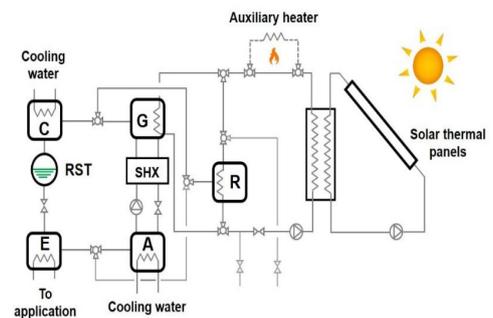
## 2. Conversion d'énergie thermique par hybridation de procédés thermochimiques

L'ensemble des politiques énergétiques et environnementales induisent des problématiques d'énergies renouvelables fluctuantes, de valorisation de sources ou chaleurs fatales basse température, d'écrêtage des pics de demande, de gestion de sources décentralisées et d'usages en autoconsommation ... Globalement, ces objectifs nécessitent la maîtrise de sources et besoins énergétiques tous deux variables en forme énergétique, disponibilité, puissance. L'accroissement de cette diversité et de cette variabilité nécessite des approches innovantes en termes de gestion mais aussi de procédés de conversion de l'énergie. Concernant la diversité des formes énergétiques, l'une des solutions est le développement de procédés multifonctionnels. Ils permettent soit la génération de plusieurs formes énergétiques à partir d'une même source, soit des productions en cascade. Quant à la gestion de la variabilité, elle consiste à mettre en œuvre un procédé de stockage, soit basiquement en rajoutant un élément, soit en recherchant une intégration efficace des procédés de production et stockage.

Globalement, peu de cycles associent flexibilité et multifonctionnalité c'est-à-dire stockage et transformation (chaleur en chaleur ou froid) ou stockage et conversion (chaleur en travail mécanique) d'énergie thermique. Pour répondre à ces défis, nous développons une nouvelle classe de procédés très peu abordés, dits hybrides, combinant deux cycles thermodynamiques pour remplir ces objectifs de flexibilité et multifonctionnalité. Les cycles élémentaires les plus pertinents à associer, et de plus, capables de valoriser les sources basse température, sont les suivants : (i) les cycles trithermes à sorption liquide/gaz (absorption) les plus performants en production de froid, (ii) les cycles trithermes à sorption solide/gaz : présentant de fortes densités de stockage, et une large gamme de réactifs donc de conditions opératoires (T,P) (iii) les cycles bithermes de puissance : Rankine ou ORC les plus efficaces, en particulier à partir d'une source basse température.

### 2.1 Production Hybridation de systèmes à absorption et thermochimique pour la climatisation solaire

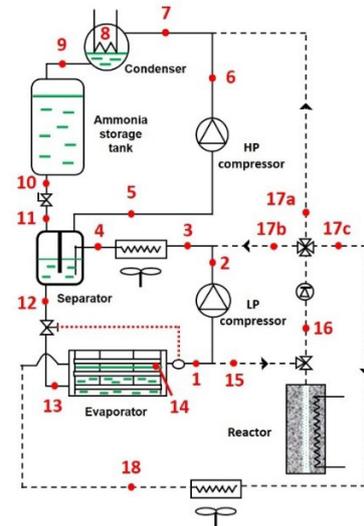
L'inertie des bâtiments et les forts apports solaires pénalisants par les baies vitrées orientées à l'ouest font que les besoins de climatisation sont plus importants en fin d'après-midi alors que la ressource solaire susceptible d'être captée en toiture commence à décliner. Les systèmes à absorption (ABS) et les transformateurs thermochimiques (TCH) sont deux procédés connus permettant la climatisation tout en utilisant de la chaleur solaire basse température (<100°C) comme source d'énergie. Ces deux procédés ont des avantages qui pourraient se combiner dans un système hybride : le condenseur et l'évaporateur sont communs car le fluide de travail ( $\text{NH}_3$ ) est le même pour les deux sous-systèmes. Le coefficient de performance du système ABS est plus élevé (0,75 au lieu de 0,35 pour TCH), tandis que le système THC permet un stockage de l'énergie solaire lorsqu'elle est abondante pour une restitution de froid différée et donc une meilleure satisfaction de la demande. Une collaboration avec l'Université de Tarragone a été initiée, avec codirection d'un doctorant, pour la définition et l'optimisation d'un tel système hybride.



Système hybride absorption/thermochimique partageant le même gaz ( $\text{NH}_3$ ).

### 2.2 Système hybride combinant une machine à compression mécanique de vapeur et un convertisseur thermochimique pour la production de froid

La production de froid est aujourd'hui largement assurée par des machines à compression mécanique de vapeur. L'objectif de cette étude est d'analyser le fonctionnement et les performances d'un système hybride pour la production de froid en combinant un cycle à compression mécanique de vapeur et à un transformateur thermochimique. D'un point de vue pratique, cette hybridation consiste à mutualiser le condensateur, l'évaporateur et le fluide frigorigène pour les deux cycles (fig. 1). Ce système hybride intègre intrinsèquement une fonction stockage et permet donc de dissocier la production de froid de la disponibilité de la source d'énergie avec un système aussi compact que possible. Dans ce système, la réduction de la pression dans le réacteur thermochimique lors de son couplage au compresseur réduit la température d'activation de la désorption de l'ammoniac ce qui permet la valorisation de source de chaleur à basse température. Pour étudier cette interaction, un modèle numérique quasi stationnaire pour les phases de stockage et de stockage a été mis au point et validé expérimentalement au moyen d'un banc expérimental de petite échelle (environ 300 Wh de stockage de froid) avec de l'ammoniac comme réfrigérant et du chlorure de baryum ( $BaCl_2$ ) comme sel réactif. Des expériences ont montré une réduction de 35 K de la température d'activation de la réaction de désorption par rapport à une désorption sans compresseur. La validation du modèle en ajustant la perméabilité et la conductivité thermique du composite réactif a montré un accord acceptable entre les courbes d'avancement de la réaction prédites et expérimentales. Le modèle validé a été utilisé pour la simulation du système dans une étude de cas préliminaire, représentative d'une demande de froid industriel (puissance de 40 kW et température de  $-25\text{ }^\circ\text{C}$ ). Il est montré que le cycle hybride atteint un COP supérieur à celui d'un système de compression mécanique de vapeur classique (fig. 2). De plus, ce COP augmente de manière exponentielle avec la part relative du stockage thermochimique dans la production de froid.

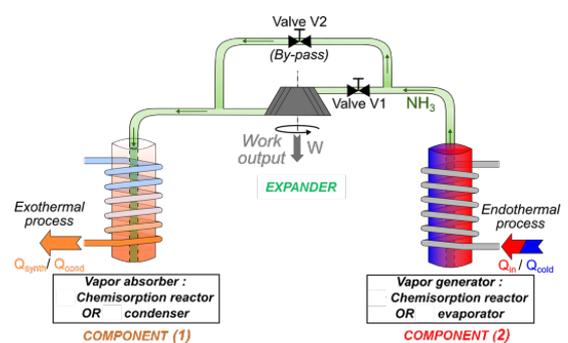


### 2.3 Procédés hybrides multifonctionnels (stockage/ travail/froid)

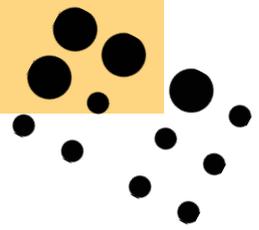
Parmi les concepts de cycles hybrides multifonctionnels, les procédés associant procédé thermochimique et cycle Rankine permettent des fonctionnalités de stockage et production de froid et/ou électricité. Le procédé de base est résumé de manière générique figure A : il s'agit d'associer des éléments générateur et absorbeur de vapeur opérant à des pressions différentes au travers d'un organe de détente ('expandeur') permettant de générer un travail mécanique. La génération de vapeur étant en général associée à un phénomène endothermique, on peut, selon les températures opératoires, réaliser en parallèle une production de froid.

Sur ce concept de base, plusieurs variantes de cycle hybride peuvent être développées selon :

- le phénomène de base dans chaque composant (1) et (2) : réaction solide/gaz ou changement d'état liquide/gaz (en général de l'ammoniac) impliquant des chaleurs sensible et conditions thermodynamiques (T, P) différentes. Le système à résorption (c.a.d à 2 réacteurs solide/gaz) apporte un degré de liberté supplémentaire par les choix des 2 réactifs solides.
- la phase utile du cycle : le composant endothermique générateur de vapeur (transmise à l'expandeur) est i) le réacteur haute température (2), la production d'électricité (entre (2) et (1)) nécessite donc la disponibilité de la source. Dans l'autre phase du cycle, le composant (1) pourra produire du froid selon ses conditions opératoires; ii) le réacteur basse température (1), on a simultanément production de froid en (1) et d'électricité (entre (1) et (2)), sans source haute température, donc grâce à l'énergie stockée au cours de l'autre phase du cycle par le réacteur (2).



Représentation schématique d'un cycle hybride thermochimique à 1 étage de détente : (1) composant basse température; (2) composant haute température. Le cycle de fonctionnement complet est constitué de 2 phases où les effets thermiques, et donc la direction du flux de vapeur, sont inversés.



Une analyse thermodynamique stationnaire a été réalisée pour cet ensemble de procédés. L'objectif est de quantifier leurs performances selon les réactifs envisagés (103 sels avec  $\text{NH}_3$ ) et les températures opératoires. L'algorithme développé assure de plus que le procédé respecte des contraintes technologiques (température de la source haute  $< 250^\circ\text{C}$ , pression haute  $< 30$  bar, ratio volumétrique de détente dans l'expandeur  $< 10 \dots$ ). A titre d'exemple, pour le cycle à productions séparées et les systèmes à résorption (S/G vs S/G), les gammes de rendements énergétiques et exergetiques sont respectivement  $[0,38, 0,62]$  et  $[0,18, 0,28]$  pour les 20 'meilleurs' sels réactifs. Les températures de source requise ( $T_{\text{hot}}$ ) vont de  $212$  à  $250^\circ\text{C}$ . Pour les systèmes impliquant un changement d'état L/V dans le composant (1), les performances sont inférieures (rendements  $\eta_{\text{EN}} \in [0,26 ; 0,47]$  et  $\eta_{\text{EX}} \in [0,12 ; 0,28]$ ). Par contre, la température haute requise est aussi plus faible : entre  $138$  et  $252^\circ\text{C}$ . Les domaines d'application et les sources valorisables seront donc différents. Les deux cas conduisent à des ratios de production mécanique  $\tau_w$  similaires, entre  $7$  et  $14\%$  de l'énergie totale produite. Cette étude est en cours d'extension aux différents concepts de cycles identifiés, et sera affinée, pour les plus prometteurs, par des simulations dynamiques sur l'ensemble du cycle de fonctionnement.

## 3. Conversion énergétique chaleur basse température / travail par procédé thermo-hydraulique

L'équipe TES développe depuis 2007 une recherche originale sur des procédés thermo-hydrauliques. Il s'agit de machines thermiques, motrice ou réceptrice, ou d'association de telles machines, dans lesquelles les échanges de travail entre le fluide dit "de travail" et l'environnement se font par l'intermédiaire d'un liquide dit "de transfert" assurant une fonction de piston liquide dans des cylindres de transfert (CT). L'intérêt est que ce transfert de travail peut se faire potentiellement avec une très bonne efficacité. Deux filières thermo-hydrauliques, dénommées Capili et CHV3T, assurent respectivement les besoins électriques d'une part, de chauffage et de climatisation d'autre part, tout en utilisant de la chaleur à "basse température", notamment solaire, comme source quasi exclusive d'énergie.

### 3.1 Trigénération par transformateur et convertisseur thermo-hydraulique

Les augmentations de l'efficacité des procédés énergétiques et de la part relative des énergies renouvelables dans le mix énergétique sont deux objectifs clairement affichés dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. La trigénération par procédé thermo-hydraulique, visant à satisfaire les besoins de chauffage, de climatisation et électriques, est bien en adéquation avec ces deux objectifs dans ce secteur résidentiel-tertiaire. Dans le moteur Capili le liquide de transfert oscille alternativement entre deux cylindres mû par un différentiel de pression du fluide de travail, lui-même résultant d'équilibres liquide/vapeur dans l'évaporateur connecté à la source chaude à  $T_h$  et le condenseur connecté au puits froid à  $T_m$ . La transformation hydraulique/mécanique/électrique peut se faire par une turbine hydraulique couplée à une génératrice. Le cycle décrit par le fluide travail se rapproche (1er type), voire se confond (2nd type) avec le cycle de Carnot et donc potentiellement avec d'excellents rendements exergetiques. Néanmoins l'alternance dans le cycle thermodynamique de phases à différentiels de pression constants (correspondant aux 2 isothermes) puis décroissants (correspondant aux 2 isentropes) aux bornes de la turbine hydraulique implique un fonctionnement instationnaire de la turbine, préjudiciable à son rendement.

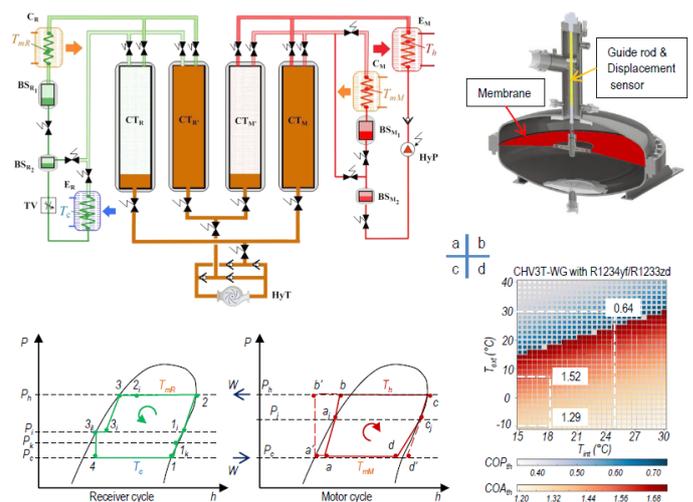


Schéma de principe et performances du système Trigéthysol. a/ Composants du système : Liquide de transfert (en marron), fluide de travail moteur (indice M, circuit en rouge) et récepteur (indice R, circuit en vert), cylindres de transfert (CT), évaporateurs (E), condenseurs (C), bouteilles séparatrices (BS), pompe et turbine hydraulique (HyP et HyT). b/ Vue éclatée d'un CT avec membrane de séparation entre le liquide de transfert et le fluide de travail. c/ Cycles moteur et récepteur dans diagramme de Mollier pour la variante CHV3T-WG. d/ Performances COP<sub>th</sub> et COA<sub>th</sub> pour un couple de fluides de travail en fonction des températures internes et externes.

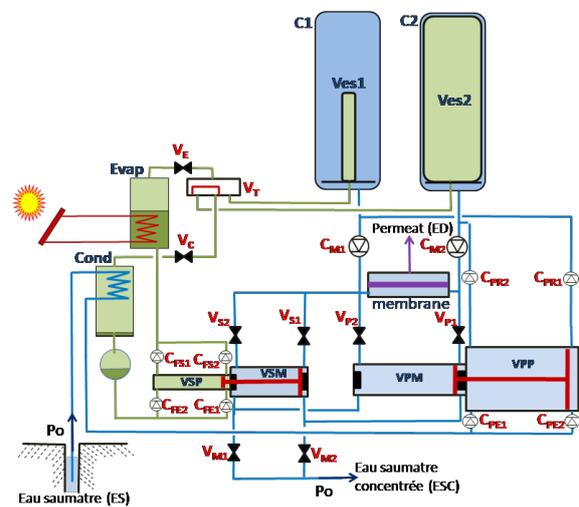
Le transformateur CHV3T est constitué par l'association de deux machines thermo-hydrauliques, l'une motrice, l'autre réceptrice, utilisant deux fluides de travail différents et échangeant de la chaleur avec deux sources (à  $T_h$  et  $T_b$ ) et un puits (à  $T_m$ ). Le transfert de travail entre les deux parties de ce système tritherme se fait par le liquide de transfert, avec un différentiel de pression nul, et directement c'est-à-dire sans transformation hydraulique/mécanique. En revanche ce transfert de travail purement hydraulique induit des irréversibilités intrinsèques dans les parties motrice et réceptrice mais celles-ci peuvent être atténuées par des récupérations internes d'énergie selon des variantes plus ou moins sophistiquées (WL, WG, WLG, WGL,...) de cette filière CHV3T.

Des premières études, avec validation expérimentale, ont montré l'intérêt de ces deux filières séparément : CHV3T appliqué à la climatisation solaire de l'habitat, Capili moteur pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers. En 2013 la société PSA a financé une petite étude théorique pour l'utilisation du procédé Capili en mode pompe à chaleur pour la climatisation de véhicules automobiles. Depuis 2014 la société SATT-AxLR et la région Languedoc-Roussillon financent, dans le cadre du projet Trigéthysol, la réalisation d'un prototype de trigénérateur thermo-hydraulique qui combine le sous-système CHV3T (variante WG) et le sous-système Capili (1er type) et utilisant essentiellement de la chaleur compatible avec l'énergie solaire basse température ( $T_h < 100^\circ\text{C}$ ).

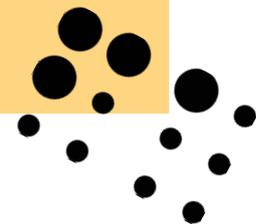
### 3.2 Dessalement osmotique d'eau saumâtre par cycle thermohydraulique solaire

L'accès à l'eau potable devient actuellement au même titre que l'énergie, une préoccupation sociétale croissante à laquelle il est urgent d'apporter des réponses technologiques. Selon les Nations Unies, un milliard de personnes vivent actuellement dans des zones où l'eau est rare et deux tiers de la population sera en situation de stress hydrique d'ici 2025. Le dessalement d'eaux de mer ou saumâtres, ainsi que le traitement d'eaux usées ou pluviales constituent une alternative capable de répondre à ces besoins croissants, à condition qu'elle soit respectueuse de l'environnement et peu consommatrice en énergie primaire. Le projet de maturation DEPOTHS vise à démontrer la faisabilité d'un concept innovant de procédé utilisant l'énergie thermique basse température telle que l'énergie solaire issue de capteurs thermiques plans, pour potabiliser de l'eau via un module membranaire d'osmose inverse. L'enjeu est de proposer à terme un dispositif autonome de production d'eau douce de faible consommation énergétique et d'une capacité maximale de production journalière de  $100\text{m}^3/\text{jour}$ , qui soit en mesure de répondre localement aux besoins en eau de populations n'ayant pas accès à l'eau potable, vivant par exemple dans des régions arides ou des régions côtières où les nappes phréatiques sont fortement salinisées du fait d'une activité agricole intensive. D'autres applications également très intéressantes peuvent être envisagées telles que le traitement des eaux usées ou pluviales ou la dépollution d'effluents industriels ou agricoles.

Le dispositif comporte 3 sous-ensembles connectés via l'eau salée. Un premier sous-ensemble permet de générer une différence de pression, par évaporation et condensation d'un fluide de travail gazeux subissant alors un cycle thermodynamique moteur proche de celui de Rankine. Un second sous ensemble constitué de deux réservoirs de transfert hydro-pneumatique, permet de pressuriser l'eau de mer à une pression suffisante pour être dessalée dans le module membranaire. Enfin un dernier sous-ensemble constitué de deux double-vérins hydrauliques double-effet, permet la récupération de l'énergie hydraulique de l'eau de mer concentrée sortant du module membranaire à haute pression, pour d'une part pressuriser le fluide de travail du dispositif thermique sous forme liquide du condenseur vers l'évaporateur, et d'autre part pour pomper et pré-pressuriser l'eau de mer à dessaler. Ce procédé permet ainsi, à partir d'une source de chaleur basse température à  $T_h$  (typiquement de  $80^\circ\text{C}$ ) et d'un puits de chaleur à  $T_b$  (comme celle de l'eau pompée de la nappe, typiquement de  $15^\circ\text{C}$ ), de produire un travail hydraulique qui in fine permet son fonctionnement autonome.



Les premières estimations de performances, obtenues par ce dispositif constitué de deux réservoirs hydro-pneumatiques de 40 litres et alimenté par  $3\text{m}^2$  de capteurs solaires plans, montre qu'il est possible de dessaler une eau saumâtre à  $6\text{g/l}$ , avec à une productivité de l'ordre de  $712\text{ l/jour}$  d'eau douce, soit une production spécifique journalière de  $237\text{ litres}/\text{m}^2$  de capteur et une consommation énergétique spécifique en énergie thermique (SEC) de  $4.5\text{ kWhTh}/\text{m}^3$  d'eau douce produit. Ces premières évaluations ont démontré le potentiel énergétique de ce concept, avec une consommation spécifique SEC thermique 2 fois plus faible que les procédés actuels de dessalement par osmose inverse considérés comme les plus performants et dont la consommation spécifique est de l'ordre de  $7$  à  $10\text{ kWhTh}/\text{m}^3$ .

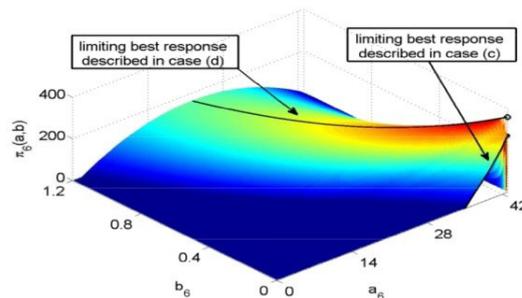


## 4. Optimisation et Modèles économiques pour l'Énergie

Les compétences de l'équipe TES en termes d'analyse mathématique touchent l'optimisation et les applications de la théorie de l'équilibre non coopératif (type équilibres de Nash) et des problèmes d'optimisation biniveaux dans la modélisation et l'étude, tant théorique que numérique, des procédés.

### 4.1 Modélisation et analyse mathématique des marchés de l'énergie

La dérégulation des marchés de l'énergie, et en particulier des marchés de l'électricité, a généré d'importants besoins de modélisation et analyse mathématique. Il s'agit en particulier d'étudier les marchés de l'électricité « Day-ahead » ou « Pay-as-bid ». Des modèles « multi-leader-single-follower » sont utilisés par l'équipe afin, par exemple, de déterminer la meilleure réponse d'un agent du marché en se basant sur une estimation des offres des concurrents. Les études portent alors sur la détermination, explicite ou numérique des ces meilleures réponses et une analyse de sensibilité par rapport aux estimations faites. Le modèle utilisé est de type multi-leader-common-follower dans lequel chaque producteur agissant sur le marché joue un rôle de leader et pour lequel le follower commun est le régulateur du marché. Nous avons montré que, bien que les enchères soient a priori sous forme quadratique, la meilleure exacte est linéaire tandis qu'une la meilleure réponse approchée est quadratique.

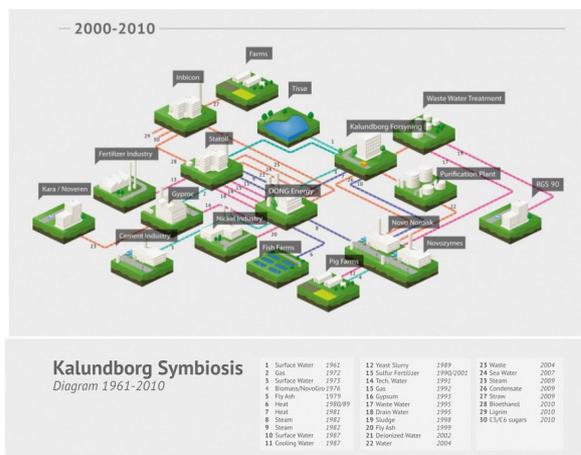


Exemple de surface de meilleure réponse d'un producteur dont l'enchère est caractérisée par une forme quadratique de coefficients  $a_6$  et  $b_6$ .

Mais au-delà des marchés, les modèles de « contract design » sont en constante évolution avec l'introduction récente de nouveaux acteurs comme les « agrégateurs » ou les « administrateurs de smartgrids » qui changent les paradigmes économiques. Nous travaillons donc sur de nouveaux modèles de contrats entre producteurs et « consommateurs » basés sur le Demand-side management où les notions de shifting ou d'effacement de demandes jouent un rôle primordial. Ces travaux ont été principalement financés par des contrats PGMO de la Fondation FMJH et en partenariat avec le département Osiris R&D EdF. Les modèles étudiés s'appuient sur de études théoriques de problèmes Multi-Leader-Follower réalisées au sein de l'équipe.

### 4.2 Optimisation de procédés et éco-parcs industriels

L'une des compétences de l'équipe TES est l'utilisation des outils modernes de l'optimisation dans la détermination du design optimal de procédés. Cette approche est en particulier appliquées au concept d'éco-parcs industriels. Cette nouvelle façon de constituer des parc industriels est basée sur la mise en commun, entre entreprises, de "fluides" (eau, vapeur, ammoniac, solvants...) ou énergie, afin d'une part de réduire l'impact écologique des ces entreprises mais, dans le même temps, de réduire les coûts de production de ces entreprises. Cette étude est menée en commun avec une équipe de génie des procédés de l'ENSIACET-Toulouse. Des modèles de type Multi-Leader-Follower ont ici aussi joués un rôle fondamental et cette approche extrêmement novatrice permet d'atteindre des réduction de coût et d'impact écologique très importants.



Afin que l'approche « éco-parcs industriel » soit pertinente, elle doit à la fois assurer la réduction de la consommation de "fluides" ou d'énergie, tout en permettant à chacune des entreprises impliquées de réaliser leur production à un coût inférieur à celui qu'elles auraient eue si elles ne s'étaient pas impliquées dans l'éco-parcs. L'approche par « équilibre de Nash » permet de déterminer des solutions (design optimal) qui seront acceptables pour toutes les entreprises.

Les outils d'optimisation sont aussi utilisés au sein de l'équipe afin de réaliser le design optimal de systèmes de production énergétique, tels de CSP avec stockage thermo-chimique ou installation de mix(énergétique en milieu isolé.





## Présentation de l'équipe

Responsable : S. Grieu (PR UPVD)

Permanents : M. Caussanel (MCF UPVD), B. Claudet (PR UPVD, 50 %), H. Duval (AI UPVD, S2EP), J. Eynard (MCF UPVD), S. Thil (MCF UPVD).

Non permanents :

Doctorants : (1) thèses soutenues : R. Chauvin (date soutenance : 22/04/16), P. Lecomte (date soutenance : 11/04/2017), G. Beauvois (date soutenance : 19/12/17), A. Lemaire (date soutenance : 25/11/19, 50 %) ; (2) thèses en cours : R. Reoyo-Prats (début : 09/16, 50 %), N. Dkhili (début : 10/17), S. Gbémou (début : 10/18), Y. Karout (début : 09/19), R. Manini (début : 09/19), A. Gallet (début : 10/19), F. Bonzoms (début : 11/19).

Post doctorants : J. Nou (période : 01/13-12/16), S. Royer (période : 09/15-08/16), A. Zaher (période : 06/16-10/16), A. Zaher (période : 11/16-08/17, 50 %), A. Zaher (période : 09/17-08/18, 50 %), H. Tolba (période : 10/17-09/19), J. Nou (période : 01/18-12/18), A. Zaher (période : 09/18-08/19, 50 %), J. Nou (période : 05/19-04/20), H. Nouasse (période : 09/19-08/20, 50 %).

CDD recherche : M. L. Yousfi (période : 02/17-07/17), K. Mahamoud Djama (période : 09/19-12/19).

Mots clés

Modélisation et identification des systèmes, traitement du signal, contrôle/commande, intelligence artificielle, instrumentation.

Références

54, 95, 98, 119, 121, 127, 148, 173, 201, 248, 263, 269, 279, 288, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 328, 329, 357, 372, 378, 379, 402, 405, 406, 417, 450, 469, 470, 483, 488, 498, 499, 512, 523, 533, 583, 599, 609, 641, 642, 643, 647, 650, 688, 689.

- en bref -



### THÈMES

1. Prédiction de la ressource solaire
2. Gestion prédictive des systèmes de production d'énergie
3. Gestion prédictive de l'énergie en milieu urbain/péri-urbain
4. Caractérisation de composants et de matériaux

### COLLABORATIONS

**Collaborations nationales**  
 ENSMA-LIAS (Poitiers), G2Elab (Grenoble), GEPEA (Nantes/Saint-Nazaire), G-SCOP (Grenoble), I2M (Bordeaux), IETR (Rennes), IRCER (Limoges), IRT (Toulouse), INPHYNI (Nice), CEA-INES (Le-Bourget-du-Lac), CEA-LIST (Saclay), CEA-LITEN

(Grenoble), PIMENT (Saint-Denis), UPS-DSL (Toulouse).

### Collaborations internationales

Allemagne : DLR ISR (Cologne), Fraunhofer ISE (Freiburg).  
 Belgique : KU Leuven (Louvain).  
 Canada : LN2 (Sherbrooke).  
 Espagne : CNH2 (Puertollano), ISFOC (Puertollano), UCLM (Ciudad Real), UCO (Cordoba), UdL (Lleida), UPC (Barcelone), USE (Séville), UJI (Castellón).  
 Portugal : IST (Lisbonne), LNEG (Porto), UMINHO-IPC (Minho), UAVR (Aveiro), UALG (Faro).  
 Singapour : SERIS (Singapour).  
 Vietnam : HaUI (Hanoi), HUST

(Hanoi), USTH (Hanoi).

### CONTRATS

Raiselife (H2020, 2016, 48 mois, partenaire) ; SFERA III (H2020, 2019, 48 mois, partenaire) ; CSPIMP (Eurogia 2020, 2013, 48 mois, partenaire) ; IMPROVEMENT (Interreg Sudoe, 2019, 36 mois, partenaire) ; DROID phase 1 (ANR PIA RSNR, 2013, 48 mois, coordinateur) ; DROID phase 2 (ANR PIA RSNR, 2019, 48 mois, coordinateur) ; Smart Occitania (ADEME, 2017, 48 mois, partenaire) ; GHlcast (SATT AxLR, 2018, 12 mois, coordinateur).

## • Rapport Scientifique •

### Introduction

#### Contexte

Les équipes « COmmande des Systèmes, Instrumentation, Caractérisation » (COSMIC) et « Supervision, Energie solaire, Systèmes Electriques » (SEnSE) ont vu le jour en septembre 2016, suite à la scission de l'équipe « Electronique, Automatique et Systèmes » (ELIAUS). Ancienne équipe d'accueil UPVD, ELIAUS (EA 3679) a rejoint le laboratoire PROMES (UPR CNRS 8521) en janvier 2011. L'équipe est localisée à Perpignan-Tecnosud, à proximité du campus principal de l'UPVD. COSMIC, aux activités de recherche pluridisciplinaires, aborde principalement l'instrumentation et l'automatisation des « systèmes » énergétiques, en particulier des systèmes ayant trait à l'énergie solaire. Est également abordée, en collaboration avec d'autres équipes du laboratoire, la caractérisation de composants et de matériaux pour applications solaires.

#### Objectifs scientifiques

Le développement d'algorithmes, à coût calculatoire maîtrisé, fondés sur l'automatique avancée (en particulier la théorie de la commande prédictive) et l'intelligence artificielle (à des fins de modélisation des systèmes et de prévision des séries temporelles),

est au cœur des activités de l'équipe. Ces dernières sont structurées par (i) la performance énergétique des bâtiments et la gestion des micro-réseaux thermiques et électriques (d'importants vecteurs de valorisation des technologies solaires), (ii) la gestion de la production décentralisée et la distribution de l'énergie électrique - il convient de garantir la stabilité du réseau électrique de distribution, menacée par la pénétration des énergies renouvelables - et (iii) l'instrumentation et le pilotage des centrales solaires photovoltaïques et thermodynamiques. Une activité transversale, essentielle à la gestion des systèmes susmentionnés, traite de (iv) la prévision multi-horizon (infra-horaire/infra-journalière) de la ressource solaire. COSMIC aborde par ailleurs (v) la gestion des chaufferies collectives « biomasse » et des réseaux de chaleur urbains (la pénétration, au sein de ces réseaux, du solaire thermique est un enjeu d'importance), (vi) la gestion des photobioréacteurs solaires (avec SHPE), (vii) le développement d'instruments de mesure destinés aux environnements radiatifs, (viii) l'optimisation de la structure de cellules solaires destinées à la concentration (avec PPCM) et (ix) l'étude du vieillissement de nouveaux matériaux pour les récepteurs solaires (avec TRECS).

## 1. Prédiction de la ressource solaire

### 1.1 Prédiction infra-horaire de l'éclairement normal dire

Au cours du projet Eurogia 2020 CSPIMP (Concentrated Solar Power plant efficiency IMProvement, 2012-2016), porté par General Electric (GE) Oil & Gas et financé, pour la France, par le Ministère de l'Industrie - le projet a eu pour objectif le développement d'outils, principalement logiciels, pour l'amélioration de la compétitivité des centrales solaires thermodynamiques (ou CSP, pour Concentrated Solar Power) -, une étude approfondie des interactions entre le rayonnement solaire et l'atmosphère a tout d'abord permis de constater que l'éclairement normal direct (ou DNI, pour Direct Normal Irradiance) pouvait se scinder en deux composantes : l'une déterministe (l'éclairement par ciel clair), l'autre stochastique (l'indice ciel clair). Ainsi, les premiers travaux ont conduit au développement d'un outil de détection en temps réel de données dites « ciel clair », d'un modèle d'estimation de l'éclairement par ciel clair et d'algorithmes pour la prédiction infra-horaire de cet éclairement. Ces algorithmes sont fondés sur un modèle empirique (le modèle développé par Ineichen et Perez), combiné à une persistance du trouble atmosphérique. Pour l'analyse de la couverture nuageuse et la prédiction de l'indice ciel clair, une caméra à grand angle de champ ainsi que différents algorithmes ont été développés. Un tel instrument offre une haute résolution spatio-temporelle, nécessaire à la prédiction infra-horaire du DNI. Trois versions du PSI (pour PROMES Sky Imager) ont vu le jour au cours du projet, menant au développement d'un instrument capable de générer des images du ciel à haute dynamique (ou HDR, pour High Dynamic Range), par fusion d'une séquence d'images à basse dynamique prises à différents temps de pose, tout en préservant la plage de linéarité du capteur (Figure 1).



Figure 1 : le PSI 3 installé à Perpignan, sur le toit du laboratoire PROMES, et quelques images à haute dynamique.

Le PSI 3 est capable de mesurer une information allant jusqu'à  $0,9^\circ$  du Soleil, permettant ainsi la détection des nuages les plus exposés et une évaluation fine du gradient lumineux dans la région circumsolaire (qui influe sur les performances optiques d'un champ solaire). L'instrument se prête donc à un usage multifonctionnel. En outre, une nouvelle formulation de la distribution de la luminance dans le ciel a permis de résoudre le problème posé par la région circumsolaire. Cette formulation, reproduisant fidèlement l'anisotropie du ciel clair, est à l'origine d'un algorithme de génération d'images de synthèse d'un ciel

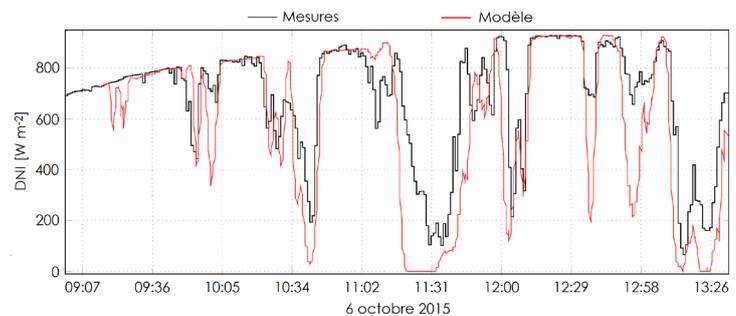


Figure 2 : un exemple de prédiction du DNI, pour un horizon de temps de 15 minutes, fondé sur des observations atmosphériques (PSI 3).

« complètement dégagé » et d'un algorithme hybride de détection des masses nuageuses. Enfin, pour la prédiction infra-horaire du DNI, un modèle déterministe simple basé sur la fraction de nuages dans le ciel (la totalité de l'image est ici considérée) s'est révélé capable de surpasser un modèle « de persistance » à partir d'un horizon de temps de 23 minutes.

Par ailleurs, au cours des derniers mois du projet Eurogia 2020 CSPIMP, différents algorithmes pour l'estimation du déplacement des masses nuageuses (direction et vitesse), issus de la littérature scientifique, ont été testés. Ces algorithmes (« correspondance de blocs » et « flot optique » ; ce dernier, un algorithme différentiel, est fondé sur l'hypothèse d'illumination constante), peu adaptés au suivi des déformations non rigides que subissent les masses nuageuses, se sont montrés incapables, pour un grand nombre de situations, d'en estimer correctement le déplacement. Pour autant, lorsque cette estimation est satisfaisante, il est possible d'identifier, sur l'image, une ou plusieurs zones d'intérêt et, à partir du calcul de la fraction de nuages ainsi que de son évolution au sein de ces zones, de prévoir l'indice ciel clair. Les résultats obtenus, bien que perfectibles, démontrent la pertinence de l'approche méthodologique développée pour la prédiction infra-horaire du DNI (Figure 2). L'estimation du déplacement des masses nuageuses restant, pour la communauté scientifique, un verrou majeur, COSMIC a entrepris le développement de nouveaux algorithmes.

La participation de l'équipe au projet EU H2020 SFERA III (Solar Facilities for the European Research Area, 2019-2023) a pour objectif, d'une part, le développement d'algorithmes pour la prévision infra-horaire du DNI à partir d'images du ciel à haute dynamique et, d'autre part, le développement d'outils pour le contrôle dynamique d'un réacteur (installé à Odeillo) destiné à la production de combustible solaire, sous conditions variables d'éclairement. Les prévisions obtenues seront communiquées aux utilisateurs des infrastructures solaires à concentration - ces utilisateurs sont généralement accueillis pour une courte durée -, leur permettant de planifier au mieux les expérimentations prévues. Une stratégie fondée sur la théorie de la commande prédictive sera développée, avec pour objectif d'améliorer les performances du réacteur susmentionné. Son modèle dynamique, nécessaire à l'implémentation d'une telle stratégie,

sera conjointement développé, à partir de données expérimentales, par COSMIC et le CEA-LITEN. Les travaux entrepris par l'équipe ont d'ores et déjà permis le développement d'un algorithme, dont les performances se sont révélées supérieures à l'état de l'art, pour la détection et la classification (supervisée) des masses nuageuses. Un réseau de neurones à convolution (ou CNN, pour Convolutional Neural Network) est utilisé. Concernant l'estimation du déplacement des masses nuageuses, un algorithme hybride est en cours de développement: pour les situations de complexité modérée, « correspondance de blocs » (pour les mouvements dominants) et « flot optique » (pour les mouvements locaux) seront combinés; pour les situations les plus complexes, l'apprentissage automatique sera considéré.

### 1.2. Méthodes statistiques pour la prévision spatio-temporelle de l'éclairement global horizontal

Dans le cadre du projet ADEME Smart Occitania (2017-2021) - le projet a pour objet le développement d'un démonstrateur de réseau électrique intelligent en zone rurale/péri-urbaine -, porté par ENEDIS (anciennement ERDF), le gestionnaire du réseau électrique de distribution, COSMIC a développé une instrumentation mixte - un réseau de pyranomètres combiné à une caméra à grand angle de champ de nouvelle génération (le PSI 4) - destinée à une zone résidentielle (un réseau électrique de distribution basse tension) située dans le département des Pyrénées-Orientales, à Villeneuve-de-la-Raho (Figure 3). Au sein de la zone, onze habitations sont équipées de panneaux solaires photovoltaïques. L'équipe aborde la prévision spatio-temporelle de l'éclairement global horizontal (ou GHI, pour Global Horizontal Irradiance), à des fins de prévision multi-horizon (l'horizon de temps est compris entre 10 minutes et 24 heures) de la production photovoltaïque.



Figure 3 : deux des pyranomètres et le PSI 4 installés à Villeneuve-de-la-Raho, près de Perpignan.

Des modèles pour la prévision localisée du GHI ont tout d'abord été développés. L'équipe a fait le choix d'une régression non paramétrique par processus gaussien, du fait de la très grande flexibilité de cet outil et de sa capacité à appréhender, par la formulation d'un « noyau » (ou fonction de covariance), différentes contraintes sur l'espace des hypothèses. Une étude comparative de noyaux standard (dont le noyau SE, pour Squared Exponential; ce noyau est communément utilisé par la communauté scientifique pour la prévision du GHI) et de combinaisons de ces noyaux (par addition ou multiplication) a mis en avant la prévalence des noyaux quasi-périodiques, prévalence d'autant plus marquée que l'horizon de prévision augmente. Ainsi, COSMIC a proposé de combiner, indifféremment sous la forme d'une addition ou d'une multiplication, le noyau périodique et le noyau quadratique rationnel (ou RQ, pour Rational Quadratic) pour la prévision multi-horizon du GHI (Figure 4). Des travaux connexes sont menés par l'intermédiaire du projet PrevPV (Prévision à court terme de la production solaire photovoltaïque pour la gestion intelligente du réseau électrique de distribution en région Occitanie, 2018-2021), financé par la région Occitanie.

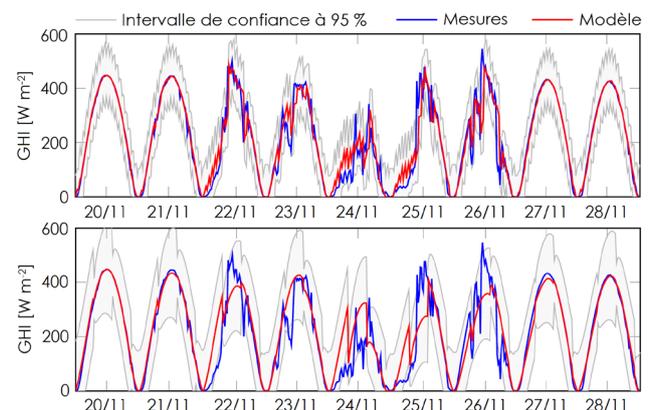


Figure 4 : un exemple de prévision (localisée) du GHI, pour des horizons de temps de 30 minutes (haut) et de 3h (bas), par régression non paramétrique par processus gaussien.

Les projets ADEME Smart Occitania et PrevPV se poursuivront, respectivement, jusqu'à mi-2021 et fin 2021. Faisant suite aux travaux mentionnés ci-avant, COSMIC a entrepris le développement d'algorithmes pour la prévision spatio-temporelle du GHI. La structure de corrélation temporelle ci-avant mentionnée sera considérée. Pour ce qui est de la structure de corrélation spatiale, l'équipe s'oriente vers un noyau non isotrope et non séparable. La prise en compte de données exogènes, qu'il est possible de déduire d'observations atmosphériques, pourrait, à terme, raffiner les prévisions obtenues. En effet, l'équipe a pour ambition de combiner, par le biais des algorithmes qu'elle développe, mesures du GHI et observations atmosphériques. Enfin, des modèles liant GHI et production solaire photovoltaïque seront développés.

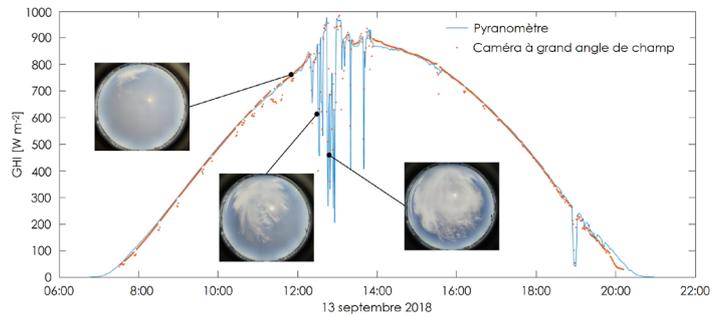


Figure 5 : un exemple de « mesure » du GHI, selon le principe décrit par les brevets FR1758549 et WO2019053232 déposés par le CNRS.

Au terme du projet Eurogia 2020 CSPIMP, le CNRS a par ailleurs déposé deux brevets (références FR1758549 et WO2019053232), valorisant les travaux de l'équipe et traitant de la « mesure », grâce à une caméra à grand angle de champ, des différentes composantes du rayonnement solaire. À partir d'une image HDR (Figure 5), il est en effet possible d'estimer l'éclairement global horizontal, l'éclairement diffus horizontal (ou DHI, pour Diffuse Horizontal Irradiance) et l'éclairement normal direct en calculant, pour les pixels appartenant à des zones spécifiques de l'image, la somme des luminances mesurées, pondérée par l'angle solide sous-tendu par chaque pixel. Pour le GHI et le DHI, mesurés horizontalement, il est par ailleurs nécessaire de tenir compte de l'angle entre chaque pixel et le zénith. Ces brevets sont à l'origine des travaux entrepris par l'équipe via le projet de maturation initiale SATT AxLR GHlcast (voir ci-après). L'algorithme développé a fait l'objet de tests préliminaires. Ces tests ont montré qu'en l'absence de pixels saturés, une estimation fiable des différentes composantes du rayonnement solaire pouvait être obtenue.

Le projet GHlcast, qui a débuté au mois de mai 2019, traite de la prévision localisée (l'horizon de temps est infra-horaire) du GHI au moyen d'une caméra à grand angle de champ puis de sa « spatialisation » (la zone d'intérêt est un champ solaire photovoltaïque, soit quelques hectares). Il conviendra, au cours du projet, de pallier les limitations matérielles du PSI 4 (les réflexions parasites survenant au sein du système optique et la présence de pixels saturés sur l'image, en particulier dans la région circumsolaire). COSMIC ambitionne d'apporter la preuve de concept d'un tel système autosuffisant, s'affranchissant autant que possible de toute instrumentation complémentaire (un ou plusieurs pyranomètres), dans l'optique d'une prévision spatio-temporelle du GHI, à des fins de prévision infra-horaire de la production électrique des centrales solaires photovoltaïques. Des algorithmes fondés sur les outils de l'apprentissage automatique sont en cours de développement.

## 2. Gestion prédictive des systèmes de production d'énergie

### 2.1. Gestion prédictive des centrales solaires

Le PSI 3, développé par COSMIC au cours du projet Eurogia 2020 CSPIMP (voir ci-avant, section 1.1 du présent document), a fait l'objet d'une installation à Palma del Rio, en Andalousie (Espagne), sur le site de la centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques « Palma del Rio II » (d'une puissance de 50 MW) exploitée par Acciona



Figure 6 : le PSI 3 installé sur le site de la centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques « Palma del Rio II ».

Energia (Figure 6). Les prévisions infra-horaires du DNI - les algorithmes développés par l'équipe ont plusieurs fois été mis à jour - sont mises à profit pour la régulation en temps réel du débit du fluide caloporteur, contribuant ainsi à l'exploitation optimale de la ressource solaire disponible et, par conséquent, à l'amélioration des performances de la centrale.

Le projet CONVERGY (Solar concentration technologies synergy towards multi-vector energy production) - l'ANR, via l'appel à projets MRSEI « Montages de Réseaux Scientifiques Européens et Internationaux » 2019, finance l'accompagnement du consortium - devrait permettre à l'équipe de poursuivre ses activités en matière de pilotage des centrales solaires à concentration. En 2020, le consortium formulera une réponse à l'appel à projets EU H2020-LC-SC3-RES-1. Le projet, porté par le Laboratoire « Nanotechnologies et Nanosystèmes » (LN2, Université de Sherbrooke), traite du développement d'un pilote de centrale solaire à tour modulaire, à double récepteur CPV/CST (Concentrating Photovoltaics/Concentrating Solar Thermal), équipé d'un système de stockage. COSMIC développera des algorithmes de prévision ainsi que des algorithmes fondés sur la théorie de la commande prédictive pour la production combinée de chaleur et d'électricité, autorisant une utilisation optimisée de la ressource solaire disponible, respectant les contraintes opératoires et maximisant la rentabilité économique de la technologie proposée. La mise en œuvre de ces algorithmes de commande requiert la définition d'une stratégie de visée. COSMIC définira cette stratégie.

Par le biais d'un partenariat avec ENGIE Green (appel à projets CRE innovation « Réalisation et exploitation d'installations de

production d'électricité innovantes à partir de l'énergie solaire, sans dispositifs de stockage », le PSI 4 sera installé sur site et complètera l'instrumentation (un réseau de pyranomètres) de deux centrales solaires photovoltaïques, l'une située à proximité de Tarascon, dans les Bouches-du-Rhône (le site « gratte-semelle»), l'autre à Saint-Silvain-Bas-le-Roc, dans la Creuse. Les pyranomètres, autonomes énergétiquement, autorisent la mesure distribuée du GHI. La caméra à grand angle de champ, qui jouera le rôle d'agrégateur de données - LoRaWAN, un protocole de communication sans fil à bas débit, à faible consommation énergétique et à très longue portée, sera utilisé -, fournira des observations atmosphériques à l'aplomb des centrales. Les algorithmes développés par COSMIC pour, d'une part, la prévision spatio-temporelle du GHI et, d'autre part, la prévision infra-horaire et infra-journalière de la production électrique des deux centrales solaires susmentionnées seront calibrés et validés in situ. Conformément au souhait d'ENGIE Green, l'évolution de ces algorithmes est d'ores et déjà programmée : à terme, des mesures de production électrique (il sera probablement nécessaire, pour les deux sites, de compléter l'instrumentation des modules photovoltaïques) se substitueront aux mesures du GHI, permettant la cartographie et la prévision « directe » de la production électrique.

## 2.2. Gestion prédictive des photobioréacteurs solaires

Par le biais d'une collaboration avec l'équipe « Bioprocédés Appliqués aux Microalgues » (BAM) du laboratoire « Génie des Procédés-Environnement-Agro-alimentaire » (GEPEA), COSMIC aborde depuis peu l'optimisation des photobioréacteurs solaires pour la production de microalgues à grande échelle. Cette production est une alternative durable aux procédés traditionnels pour, d'une part, la production de biocarburant et, d'autre part, la dépollution des eaux par absorption des effluents ou la dépollution des gaz par captation du CO<sub>2</sub>. Toutefois, les performances et le bilan énergétique doivent être améliorés et les coûts de production diminués. Il convient par ailleurs, afin de favoriser la croissance des microalgues, d'optimiser les transferts

gaz/liquide. Les travaux ont permis le développement et la validation d'un modèle dynamique de photobioréacteur à « panneau incliné ». *Chlorella Vulgaris* est la souche considérée. COSMIC a par ailleurs entrepris le développement d'algorithmes de prévision et d'algorithmes fondés sur la théorie de la commande prédictive pour optimiser la captation solaire et atteindre des performances cinétiques et énergétiques optimales et stables. Ces algorithmes seront validés in situ, grâce à la plateforme AlgoSolis (Nantes/Saint-Nazaire). Ces travaux sont co-financés par l'ADEME et la région Pays-de-la-Loire. L'équipe SHPE apporte son expertise en matière de procédés solaires.

# 3. Gestion prédictive de l'énergie en milieu urbain/péri-urbain

## 3.1. Gestion prédictive d'un réseau électrique de distribution basse tension

Dans le cadre du projet ADEME Smart Occitania, COSMIC travaille au développement d'une stratégie de gestion prédictive du réseau électrique de distribution basse tension mentionné ci-avant (une zone résidentielle à Villeneuve-de-la-Raho ; section 1.2 du présent document). Cette stratégie a pour objectif principal de limiter l'influence de la production solaire photovoltaïque sur la stabilité du réseau (cette production est à l'origine de contraintes, principalement observées en tension). Un problème d'optimisation à horizon glissant a été formulé, permettant de minimiser l'écart entre production et consommation, tout en respectant les contraintes de courant et de tension définies par ENEDIS, en ayant recours à des flexibilités basse tension (un méthaniseur et un château d'eau) (Figure 7).

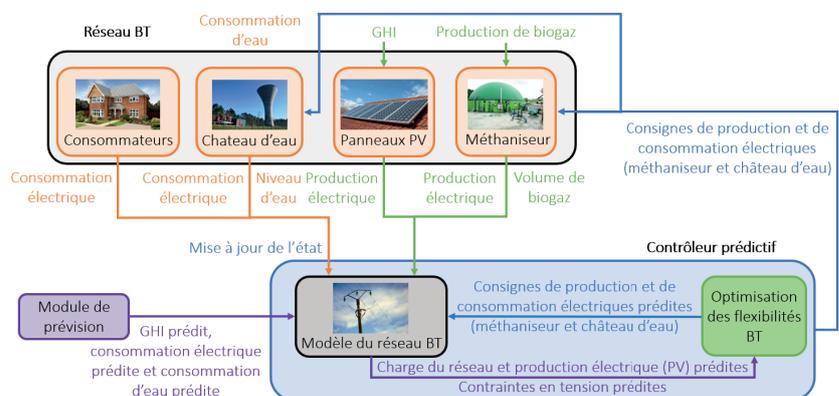


Figure 7 : la stratégie de gestion prédictive du réseau électrique de distribution basse tension de Villeneuve-de-la-Raho (Pyrénées-Orientales).



Des algorithmes pour la prévision, à horizon de temps infra-journalier, de la charge du réseau électrique de distribution basse tension - l'algorithme développé à cet effet est fondé sur une régression non paramétrique par processus gaussien - et de la consommation d'eau ont été développés. Les résultats obtenus (Figure 8) tendent à démontrer que la stratégie proposée contribue à la stabilité du réseau : l'écart entre production et consommation est réduit, les contraintes en tension minimisées. Des travaux visant à améliorer la résolution du problème d'optimisation, tout en conservant un temps de calcul acceptable, sont en cours. Enfin, sera étudiée la robustesse de cet algorithme aux erreurs de prévision.

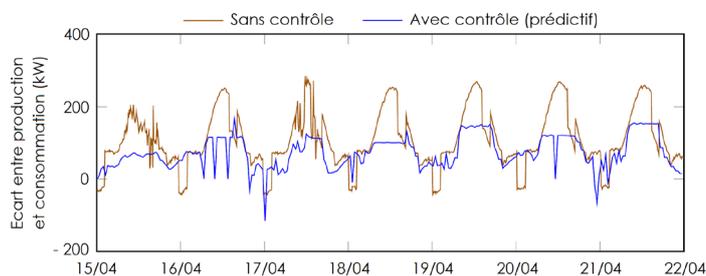


Figure 8 : l'écart entre production et consommation (Villeneuve-de-la-Raho), avec et sans contrôle prédictif.

### 3.2. Gestion prédictive de l'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires

Par l'intermédiaire du projet GEIBAT (Gestion « Intelligente » de Bâtiments Basse Consommation en Région Occitanie, 2019-2022), co-financé par la région Occitanie et Roussillon Aménagement, une société d'économie mixte, COSMIC a entrepris le développement d'algorithmes pour la gestion prédictive d'un micro-réseau électrique - un ensemble de bâtiments « basse consommation » dédiés à la vinification, à la mise en bouteille et au stockage d'une production viticole locale, situés à Rivesaltes, près de Perpignan - équipé de panneaux solaires photovoltaïques, de batteries et d'un véhicule électrique. L'interopérabilité de ces systèmes sera mise à profit. L'autoconsommation sera favorisée, limitant de fait la dépendance du micro-réseau susmentionné au réseau électrique de distribution. Enfin, les possibilités offertes par l'effacement et l'îlotage seront évaluées.

Le projet Interreg Sudoe IMPROVEMENT (Integration of Combined Cooling, Heating and Power Microgrids in Zero-energy Public Buildings Under High Power Quality and Continuity of Service Requirements, 2019-2022), financé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), traite de l'intégration des énergies renouvelables (en particulier des technologies solaires) au sein de bâtiments publics faisant face à des charges dites « critiques » afin d'en améliorer l'efficacité énergétique. En raison de leur domaine d'activité, garantir la continuité de l'approvisionnement en énergie est un enjeu fondamental. Par le biais de micro-réseaux pour la génération combinée de froid, de chaleur et d'électricité, ainsi que de

systèmes hybrides de stockage d'énergie, IMPROVEMENT ambitionne la « conversion » de ces bâtiments en bâtiments à faible consommation d'énergie. À cet effet, COSMIC a entrepris le développement d'algorithmes fondés sur la théorie de la commande prédictive pour la gestion énergétique de ces bâtiments publics : un BEMS, pour Building Energy Management System, sera développé par l'équipe. Deux bâtiments pilotes, l'un en Espagne (à Puertollano), l'autre au Portugal (à Porto), permettront la validation in situ des algorithmes développés.

COSMIC pourrait par ailleurs prendre part au projet BREVES (Buildings with Renewable Energy for Vietnam, to Empower Sustainability), l'ANR (via l'appel à projets MRSEI « Montages de Réseaux Scientifiques Européens et Internationaux » 2019) finançant l'accompagnement du consortium et la préparation d'une réponse à l'appel à projets EU H2020 MSCA-RISE-2020. Le projet, porté par le laboratoire G2Elab (Université Grenoble Alpes), a pour objectif, par le biais d'échanges de chercheurs et d'enseignants-chercheurs, ainsi que par le partage des savoirs, d'accompagner la transition énergétique au Vietnam. Il traite de l'intégration des technologies solaires aux bâtiments résidentiels, industriels et tertiaires, en soutien du réseau électrique de distribution (dont la stabilité est fortement menacée par l'augmentation de la consommation énergétique et, à terme, le déploiement d'une production décentralisée). COSMIC, grâce au projet, pourra confronter et, si nécessaire, adapter ses algorithmes de gestion des micro-réseaux électriques aux modes de consommation, aux usages de l'énergie et aux particularités climatiques du pays (un climat tropical, chaud et humide).

## 4. Caractérisation de composants et de matériaux

### 4.1. Développement et fiabilité de systèmes à fibres optiques en environnements radiatifs

Depuis une dizaine d'années, EDF R&D aborde la mesure répartie de température par fibre optique (rétrodiffusion Raman) pour cartographier les tuyauteries du circuit primaire d'une centrale nucléaire en fonctionnement. Les conditions environnementales sévères (température de 350 °C et rayonnement  $\gamma$ ) dégradent la fibre optique. Ainsi, de 2014 à 2017, des travaux (CIFRE PROMES/ EDF R&D) ont porté sur l'étude des effets du rayonnement  $\gamma$  sur une fibre à revêtement en or, en fonction de la température et dans la gamme de longueurs d'onde qui concerne la rétrodiffusion (1064 nm - 50 nm). Les résultats obtenus permettent d'envisager la mesure de température par fibre optique exploitant l'effet Raman dans de tels environnements et servent à quantifier les incertitudes de mesure associées.

Depuis 2008, COSMIC collabore avec le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) à l'évaluation de fibres optiques commerciales. Les travaux entrepris ont pour objet d'identifier des composants pertinents, ainsi que leurs longueurs d'onde d'utilisation optimales, pour un fonctionnement en environnement radiatif. Les fibres optiques sont choisies en réponse à un besoin précis, dans le cadre d'un projet spatial en cours, ou bien sélectionnées parmi les composants disponibles sur le marché, sur la base d'une logique de prospection. Les résultats expérimentaux obtenus depuis le début de l'activité sont désormais rassemblés dans une base de données en ligne nommée RadFiber, accessible à l'adresse suivante : <http://radfiber.univ-perp.fr>.

Financé depuis fin 2013 par le programme RSNR (Recherche en Sûreté Nucléaire et Radioprotection) du PIA (Programme d'Investissement d'Avenir), le projet ANR DROÏD (Distributed Optical Fiber Dosimeter) a pour objectif le développement d'un dosimètre linéaire réparti utilisant une fibre optique comme capteur. Il permettra, à terme, une mesure de dose de radiation sur la totalité de la longueur de la fibre avec une résolution spatiale métrique. La première phase du projet (2013-2018) a permis le développement d'une fibre optique à la sensibilité record aux radiations à la longueur d'onde 850 nm : 0,45 dB/m·Gy.

La deuxième phase du projet (2019-2022) ambitionne le développement d'un démonstrateur, par la suite testé en environnement opérationnel par le CEA et par EDF R&D. À ce jour, il n'existe pas de dosimètre linéaire (1D) réparti commercial et le système développé par COSMIC viendra combler un manque entre les capteurs ponctuels (0D) et la gamma caméra (2D). Le démonstrateur sera composé : (i) de la fibre optique développée au cours de la première phase du projet (dont l'équipe a entrepris d'optimiser, d'une part, la composition chimique et, d'autre part, les paramètres opto-géométriques), (ii) d'un réflectomètre optique haute résolution (dont l'équipe cherche à améliorer le fonctionnement, ce dernier ne répondant pas, à ce jour, au cahier des charges ; CIFRE PROMES/Aurea Technology) qui mesure l'Atténuation Radio-Induite (ARI) de la fibre et (iii) d'un modèle de connaissance permettant

l'estimation, à partir de l'ARI, de la dose reçue.

### 4.2. Optimisation de cellules en GaSb destinées à la conversion photovoltaïque sous concentration

Depuis 2011, COSMIC collabore avec PPCM à la mesure par OCVD (Open Circuit Voltage Decay) de la durée de vie des porteurs minoritaires présents dans les matériaux semiconducteurs destinés aux cellules solaires. Suite au développement d'un banc de mesure, les travaux entrepris ont notamment permis d'acquiescer une bien meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans les matériaux Si et GaAs. Grâce à ces travaux, la réalisation d'une mesure, jamais encore effectuée sur GaSb, apparaît possible. Des détails quant à ces travaux sont donnés dans le rapport scientifique de l'équipe PPCM.

### 4.3. Etude du vieillissement de nouveaux matériaux pour les récepteurs solaires

L'étude du vieillissement de nouveaux matériaux pour les récepteurs solaires se poursuit dans le cadre du projet EU H2020 Raiselife (Raising the Lifetime of Functional Materials for Concentrated Solar Power Technology, 2016-2020). En bref, les échantillons sont soumis à des cycles thermiques agressifs et répétés, l'évolution de leurs propriétés optiques et thermophysiques est suivie. Pour les propriétés thermophysiques, des méthodes d'estimation fondées sur l'intelligence artificielle (les réseaux de neurones artificiels) ont été développées par COSMIC. Grâce à ces méthodes, il est aujourd'hui possible d'estimer simultanément des propriétés corrélées (la diffusivité thermique et la conductivité thermique). C'est une avancée remarquable, les méthodes inverses traditionnellement utilisées étant incapables d'aboutir au même résultat.

Les travaux portant sur la caractérisation de matériaux pour les récepteurs solaires se poursuivent dans le cadre du projet EU H2020 SFERA III, l'objectif étant de caractériser un récepteur solaire (complet) en conditions de fonctionnement. Il s'agit, tout d'abord, d'optimiser l'utilisation du dispositif expérimental IMPACT, basé sur l'émission acoustique, afin de mieux comprendre les mécanismes de vieillissement des matériaux pour les récepteurs solaires. Pour cela, des tests sont menés au four solaire d'Odeillo sur différents échantillons de référence présentant des défauts connus. La finalité de ces tests est la création d'une base de données permettant d'identifier les signatures acoustiques de ces défauts. Ces techniques seront par la suite transposées à l'échelle 1, sur un prototype de récepteur en fonctionnement équipé de capteurs acoustiques de nouvelle génération. L'analyse de la fonction de transfert du récepteur à l'aide des algorithmes de reconnaissance de forme que développera COSMIC, impliquant des outils du traitement du signal et de l'intelligence artificielle, permettra de localiser avec précision les événements acoustiques et d'identifier, au sein de cette géométrie complexe, les défauts correspondants.



## Présentation de l'équipe

Responsable : T. Talbert (MCF HDR)

Permanents : O. Fruchier (MCF), D Gachon (MCF), F Thiery (MCF), A Traore (MCF).

Non permanents :

Doctorants : (1) thèse soutenue : E. Duverger (date soutenance : 09/07/2019), (2) thèse en cours : A. Benzagmout (début : 15/11/2017).

Post doctorant : S.Royer (01/07/2018)

Mots clés

Electronique de puissance, Smart-grid, caractérisation électrique, modélisation électrique.

Références

148, 149, 357, 390, 414, 417, 427, 439, 440, 455, 460, 481, 531, 532, 539, 540, 558, 605, 606, 619, 635, 636, 652, 654, 662, 663, 664, 681, 682, 686, 687, 697, 704.

- en bref -



### THÈMES

1. Photovoltaïque - La modélisation et la caractérisation électrique de composants pour le solaire
2. Systèmes électriques
3. Outils informatiques et de caractérisation

### COLLABORATIONS

Collaborations nationales  
IES (Montpellier), SATI (Cachan), LAAS (Toulouse).

### Collaborations internationales

UMI LN2 Sherbrooke, Universidad Politécnica (Madrid), Facultad de Ciencias da Universidade de Lisboa, Universidade da Beira Interior, Fundación para la Sostenibilidad Energética y Ambiental, Fundación-Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, Corporación tecnológica de Andalucía.

### CONTRATS

TransEner (SUDOE, 2016, 36 mois, partenaire); SGMC (READYNOV, 2018, 24 mois, partenaire); Rivesaltes Grid (CRE, 2015, Partenaire); Région Occitanie SmartPV (Industriel/Région, 2017, 36 mois coordinateur); UNITECK (Industriel, 2015, 12 mois, coordinateur).

## • Rapport Scientifique •

# Introduction

### Contexte

La création de l'équipe SEnSE en 2016, a regroupé dans une même équipe, l'ensemble des compétences liées au domaine de l'électricité au sens large du terme. L'activité scientifique de l'équipe SEnSE est donc dédiée à l'étude, la caractérisation, la modélisation, la gestion et la supervision de systèmes électriques intégrant principalement des sources à énergies renouvelables. Les systèmes utilisant ou couplant les sources photovoltaïques (PV), photovoltaïque sous concentration (CPV) et solaire thermique à d'autres sources sont le centre de nos études.

### Objectifs Scientifiques

Nos activités de recherche concernent la modélisation et la caractérisation électrique de composants pour le solaire et les systèmes électriques. Nous nous intéressons à la modélisation et la caractérisation des cellules PV, CPV et aux convertisseurs, composants en aval de la source (Buck, Boost, SEPIC, onduleur, etc.) ainsi qu'aux composants qui les composent (coupleurs magnétiques, IGBT).

Nous développons des recherches dans le domaine de l'embarqué pour la réalisation de smart-sensor communicant, de l'électronique de puissance avec la réalisation de nouvelles architectures maximisant le rapport poids/puissance des systèmes de conversion électrique et de la régulation. En effet, l'architecture des systèmes d'électronique de puissance nécessite d'être distribuée suite à la multiplication des convertisseurs électriques que l'on retrouve de plus en plus nombreux sur les réseaux contenant des EnR.

Nous travaillons également sur la détection et l'identification des signatures électriques des défauts et la réalisation de superviseur pour améliorer/optimiser le fonctionnement des transferts de l'énergie électrique utilisée dans un système autonome et/ou un réseau électrique intelligent (Smart-grid).



## 1. Photovoltaïque - La modélisation et la caractérisation électrique de composants pour le solaire

Depuis une dizaine d'années, de nombreux progrès ont été effectués sur les installations PV afin d'en augmenter leur efficacité. Il existe peu de travaux concernant un système complet permettant la détection, l'identification et la localisation de défauts électriques dans les installations photovoltaïques. L'analyse de la signature électrique représente l'une des approches les plus efficaces pour la détection de défauts et cela de manière non intrusive et pouvant se dérouler en temps réel. Nous avons mis en place des systèmes de supervision de systèmes de détection, de localisation et l'identification des défauts.

Parmi les questions que nous avons décidées d'aborder, nous retrouvons : Quels défauts devront être identifiés ? Quelle technique devra être utilisée ? Mais surtout pour quels coûts et quels gains ? Une solution possible consiste à avoir dans les installations PV un système permettant d'effectuer cette détection pour l'installation complète ou pour des zones particulières. Ce système de mesure électrique (comme un traceur IV), s'insérant dans l'installation, comprend un système de traitement de l'information adéquat. Il permet alors d'effectuer une détection et éventuellement une identification et une localisation des défauts dans des modules photovoltaïques. Les mesures sont alors utilisées pour mettre en place des modèles sous le logiciel de simulation PLECS.

La comparaison des mesures et de la modélisation doivent nous permette de remonter à localisation et l'identification des défauts. Pour ce faire, nous avons développé au laboratoire une plateforme de caractérisation qui intègre un système hardware (traceur I-V) couplé à un système software de traitement de l'information.

Cette plateforme présente une précision de mesure élevée de 4096x4096 points, la tenue en puissance (500W) et en tension électrique élevée (300V), et ainsi sa structure hardware modulaire (valise transportable).

Nous retrouvons, par la plateforme expérimentale et par la modélisation (Figure 1), la signature de panneau défaillant dans des cas d'ombrages de cellules du panneau photovoltaïque (Figure 2). Les simulations obtenues montrent que notre modèle est capable de décrire le comportement d'un panneau réel et l'impact sur le fonctionnement d'un système PV (Figure 3). (Partenaires : ENGIE Green, Institut d'Electronique (IES), Région Occitanie)

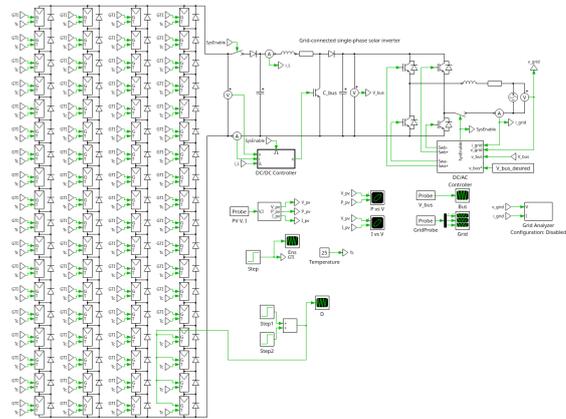


Figure 1: Architecture permettant la simulation de défauts dans une installation PV.

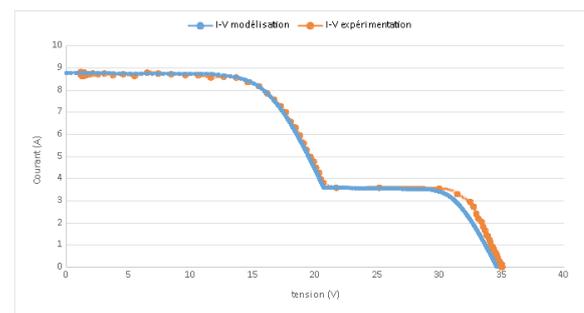


Figure 2: Comparaison simulation/mesure de la signature électrique d'une cellule partiellement ombrée.

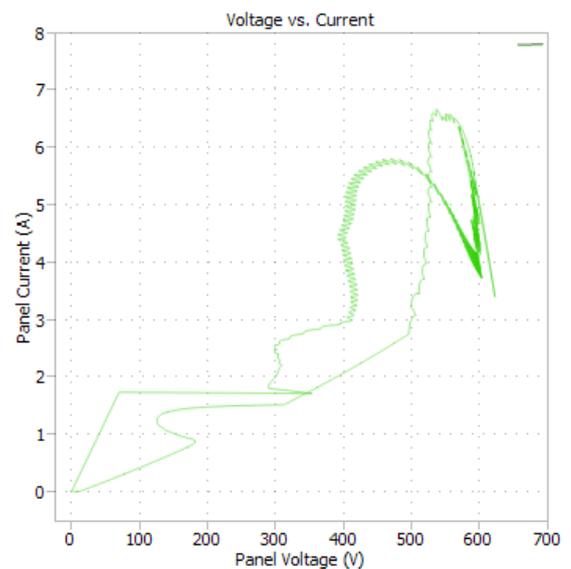


Figure 3: Exemple en temps réel de l'impact d'un défaut sur le bus DC d'un onduleur.

## 2. Systèmes électriques

L'équipe est sollicitée depuis de nombreuses années pour la maîtrise et l'étude de système dans le domaine des énergies renouvelable. Actuellement nous travaillons sur plusieurs plateformes qui possèdent des équipements de production et des équipements expérimentaux.

### 2.1. Prévision court terme : modélisation contrôle

Le projet Rivesaltes Grid a pour objectifs d'optimiser la gestion énergétique des micro-grids en développant des stratégies de contrôle (puissance des convertisseurs, délestage ou décalage des charges, ...) incluant les nouveaux usages de l'électricité comme l'auto-consommation, les véhicules électriques et le stockage. L'élaboration de ces stratégies requiert plusieurs tâches : modélisation du micro-grid (champ PV, système de stockage et véhicule électrique), prévision de production/consommation et détection des défauts pour prévenir et identifier les problèmes qui peuvent apparaître sur le micro-grid. Une plateforme expérimentale comportant 3 ombrières PV de 20kW chacune, un bâtiment industriel en auto-consommation, un système de stockage lithium-ion de 85 kWh et un véhicule électrique est entièrement dédiée à ce projet. L'optimisation de la gestion énergétique des micro-grids avec source PV nécessite un outil de prédiction de la production électrique. Cet outil est composé d'une part de la prévision de la ressource solaire et la modélisation du générateur PV d'autre part. Le développement de ces outils pour la prédiction de l'irradiation solaire ajouté aux différents modèles du micro-grid tels que le champ PV, le système de stockage ou encore la prévision de consommation, ont permis:

- de développer des stratégies de contrôles optimisées pour l'orientation de suiveur solaire en fonction de l'état du ciel et ainsi augmenter de plus de 10% le rendement de ce type de structure,
- de réaliser la simulation du comportement du micro-grid. Elle a permis à partir d'un processus itératif d'estimer les flux d'énergie et l'état du système défini par l'état de charge des batteries pour chaque pas de temps de la période d'étude. Ces résultats ont ensuite été comparés aux mesures expérimentales. Enfin, la simulation a été utilisée pour étudier l'impact de la puissance PV et de la capacité du système de stockage sur le comportement du micro-grid et sur les taux d'autoconsommation et d'auto-production,
- de mettre en place différentes stratégies de gestion des flux énergétiques afin de minimiser le coût de fonctionnement du micro-grid. La gestion combinant une commande par règle et une commande prédictive présente le meilleur résultat et a ainsi permis de réduire de 6,2 % le coût de fonctionnement du micro-grid par rapport à une gestion classique du système de stockage.,
- enfin, de développer un outil d'aide au dimensionnement d'installation destinée à l'auto-consommation à l'aide d'un critère basé sur le coût actualisé de l'énergie, le LCOE (Levelized Cost of Energy en €/Kwh), englobant le coût financier de l'installation.

### 2.2. Smart-Grid

#### 2.2.1 Rivesaltes Grid

Le site de Rivesaltes Grid (Figure 4) traite de l'utilisation et de la gestion des nouveaux usages de l'électricité. Elle est rattachée à un projet de centrale photovoltaïque de 13,5 MWc qui a été présenté et retenu à l'édition 2013 de l'Appel d'Offres (AO) national "Solaire" de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE). C'est dans ce cadre que l'on trouve cette plateforme qui concerne les interactions entre d'une part une source de production d'origine renouvelable (des ombrières photovoltaïques), et d'autre part un bâtiment en auto-consommation, un système de stockage et un véhicule électrique. Cette installation s'inscrit donc pleinement dans la tendance actuelle et anticipe les futures mutations du réseau électrique en simulant et évaluant la gestion de ces nouveaux



Figure 4: Installation Rivesaltes-Grid

usages de l'électricité à partir d'un démonstrateur entièrement dédié.

#### Impacts de la puissance PV et de la capacité de stockage

Lorsque nous avons fait varier la puissance PV installée entre 0 et 75 kWc, et la capacité de la batterie entre 0 et 340 kWh, le résultat du taux d'auto-consommation de l'ensemble des simulations montrent tout d'abord un taux d'auto-consommation nul lorsqu'on n'a pas d'installation PV. Cela est totalement logique puisque sans production locale, le site industriel doit soutirer 100 % de son énergie qu'il consomme. La seconde observation est que pour une puissance PV donnée, le taux d'auto-consommation augmente avec la capacité batterie avant de se stabiliser. Cela s'explique par le fait que le système de stockage est un système tampon permettant de décaler la production au moment de la consommation. Par conséquent, une plus grande part de l'énergie produite sur site est consommée :  $E_{\text{produite/consommée}}$  augmente entraînant par la même occasion une augmentation du taux d'auto-consommation et d'auto-production. Néanmoins, à partir d'une certaine capacité de batterie l'auto-consommation est quasiment constante car toute l'énergie valorisable l'a été.



Le seul cas où l'augmentation du système de stockage ne permet pas d'améliorer le taux d'auto-consommation est entre 0 et 21,5 kWh de batterie pour les puissances de champ PV inférieures ou égales à 15 kWc. En effet, l'ajout d'un système de stockage introduit également des consommations indispensables à son fonctionnement (BMS, EMS, climatisation) réduisant ainsi la part de l'énergie produite localement qui alimente le bâtiment industriel.

À part pour le cas particulier d'une installation sans stockage, le taux d'auto-consommation est maximal pour un champ PV proche de 15 kWc. Au-delà de cette puissance, l'auto-consommation se dégrade car une plus grande quantité de la production PV doit être bridée et est donc non valorisable. Entre 0 et 15 kWc, le taux d'auto-consommation est également plus faible, car l'énergie produite est tout d'abord utilisée pour alimenter les auxiliaires avant de fournir le site industriel.

Sur les Figures 5 et 6, on observe que le paramètre le plus influençant est la puissance du champ PV. Entre 0 et 30 kWc, le taux d'auto-production augmente fortement avant de se stabiliser. De même, l'augmentation de la capacité du système de stockage, notamment entre 0 et 63,75 kWh améliore l'auto-production. À partir d'une puissance PV de 30 kWc et d'une capacité de stockage de 63,75 kWh, on observe un plateau qui se rapproche lentement de 1. Nous voyons que l'augmentation de la capacité du système de stockage améliore les deux taux: le taux d'auto-consommation et le taux d'auto-production. La puissance du champ PV a quant à lui un impact différent: l'auto-consommation est dégradée lorsque le champ PV devient de plus en plus important, alors que l'auto-production se rapproche de 100 %. (Partenaires : ENGIE Green)

## 2.2.2. Port-Camargue

Le projet de Smart Grid Marina & Camping est issu d'une étude de la consommation d'énergie de la régie de Port Camargue que l'équipe a mené sous la demande du gestionnaire. Il s'agit d'un Port qui fait face à une consommation énergétique croissante chaque année de la part de ses plaisanciers. Sa grande taille fait qu'il peut être considéré comme une petite ville en termes de consommation d'énergie électrique.

### Modélisation du réseau électrique

Le modèle conceptuel est effectué avec le logiciel de simulation de réseau électrique PLECS, "The simulation platform for power electronic systems" (Figure 7). Des simplifications sont faites sur les lignes de transmissions, représentées par des composants discrets dans des cellules Pi en cascade, la charge, les sources et les postes de transformations. Cette évolution doit permettre de prendre en compte les actions des acteurs du système électrique, tout en assurant une livraison électricité plus efficace, économiquement viable et sûre. La difficulté réside dans le dimensionnement des résistances et des inductances afin que le comportement du circuit soit proche de celui de Port Camargue. La difficulté de la simulation d'un tel réseau est limitée par le peu d'études et de références sur les micro-réseaux des ports de plaisance (Figure 8). (Partenaires : Région Occitanie. HBF, Wattlet, Régie de Port Camargue)

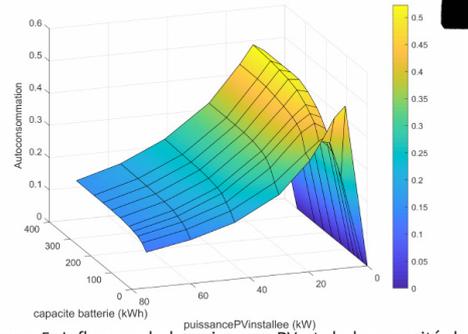


Figure 5: Influence de la puissance PV et de la capacité de stockage sur l'auto-consommation.

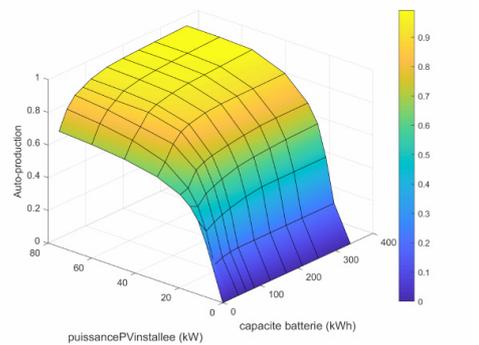


Figure 6: Influence de la puissance PV et de la capacité de stockage sur l'auto-production

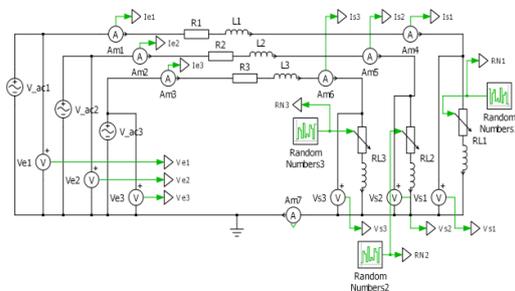


Figure 7: Modèle conceptuel (PLECS)

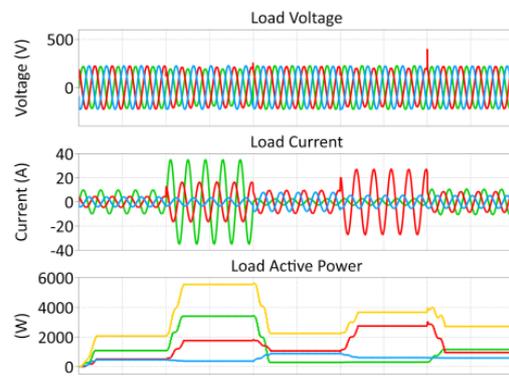


Figure 8: Évolution de la consommation perturbé par la connexion/déconnexion des bateaux

### 2.3. Électronique de puissance

L'ensemble des projets qui traitent du photovoltaïque sous concentration (CPV), s'intéresse systématiquement à l'amélioration de la conversion de la cellule. La limitation des systèmes actuels est liée directement à la réutilisation pour le CPV de l'architecture électrique du PV. Les systèmes sont donc limités par le nombre de cellules qui sont placées en série pour constituer un string. Un seul défaut dans une cellule suffit à limiter le fonctionnement de l'ensemble du string. Le problème devient d'autant plus important que la puissance de la source est grande. Les laboratoires PROMES-CNRS, SATIE et IES travaillent conjointement sur la mise en place de nouvelles architectures comme l'association d'une cellule, d'un module, ou d'un groupe de modules CPV avec un convertisseur ou une cascade de convertisseurs DC/DC. L'objectif est ici d'étudier différentes structures élévatrices, spécifiquement développées pour le CPV, pour la réalisation d'un bus continu Haute Tension (HVDC) et stable. Cette étude doit permettre de proposer des architectures de connexion permettant de maximiser le rendement des installations photovoltaïques à concentration.

Plusieurs structures ont été étudiées. Les différents cahiers des charges du DC/DC ont toutes un  $V_e$  de 3,3 V, un  $V_s$  de 12, 120 V ou 500-600 V en fonction des structures étudiées. Les puissances sont respectivement d'environ 30 W et 300 W. Dans tous les cas, la fréquence de travail est comprise entre 1 kHz et 1 MHz dans les différentes structures, pour assurer une intégration maximale au plus proche de la cellule. La première structure étudiée est réalisée, est une structure DC/DC élévatrice pour 1 cellule (Figure 9). Cette structure fonctionne à 400 kHz et possède un rendement de plus de 90 % (Figure 10). Cette structure a été utilisée en cascade pour la réalisation d'un bus de tension DC de 500-600V (Figure 11). En parallèle, nous avons travaillé sur le développement d'une structure d'électronique de puissance non directe. C'est-à-dire qu'elle utilise un composant magnétique en élément intermédiaire de transfert et de transformation de l'énergie (Figure 12). La puissance à transférer est ici de 10 fois la version précédente (300 W). La totalité de la structure précédente a été étudiée et modélisée, pour l'instant nous n'en sommes qu'à la partie modélisation de la structure. Mais celle-ci présente de nombreux avantages avec entre autre une simplification de la commande, une fiabilité accrue, mais aussi un rendement potentiellement plus important.

(Partenaires : SATIE, Institut d'Electronique (IES))

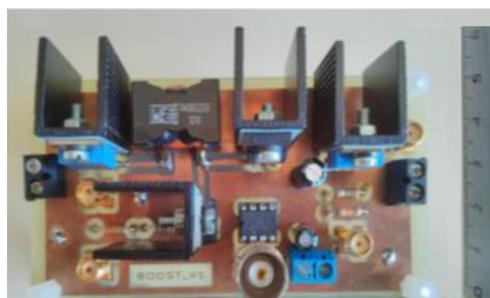


Figure 9: Convertisseur Boost Vint 3,3V Vout 12V.

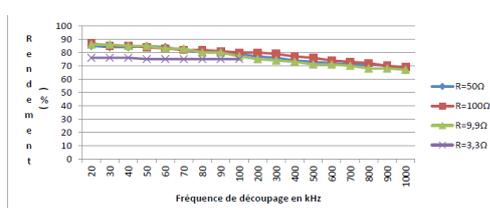


Figure 10: Rendement Boost en fonction de la charge et la fréquence.

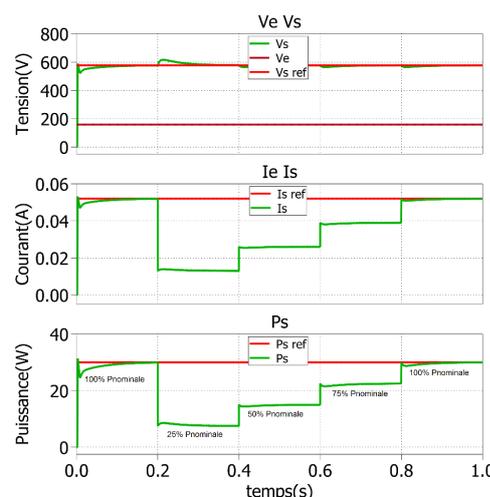


Figure 11: V, I, P variation de la charge en boucle fermée de 4 convertisseurs Boost pour une cellule CPV.

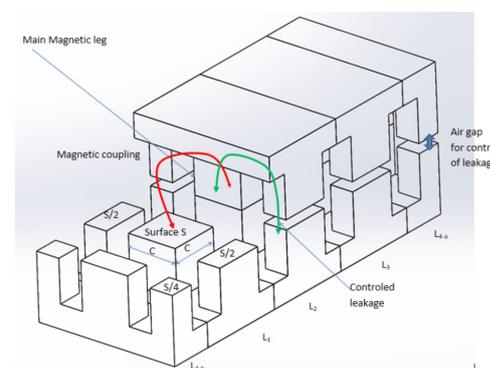


Figure 12: Coupleur magnétique 5 entrées.



### 3.2. Outils de caractérisation

Nous sommes en train de finaliser la mise en place d'une plateforme de caractérisation PV (dont les outils logiciels présentés dans le paragraphe précédent font partie intégrante), pour répondre principalement à deux problèmes de recherche: la caractérisation de cellules et de panneaux PV/CPV en vue de mettre en place des solutions de détection et d'identification de défauts ; proposer des stratégies d'optimisation de la gestion énergétique et économique des micro-réseaux en développant des stratégies de contrôle, ainsi que de nouveaux usages tels que l'autoconsommation, les véhicules électriques et le stockage (localisé ou distribué).

Mais aussi, pour mettre à disposition des moyens de caractérisation des matériaux, cellules PV/CPV, modules PV/CPV et d'essais à l'échelle 1 de dispositifs solaires du composant au système, en particulier comme prestations mais aussi pour des projets ; pour avoir une activité de services en tant qu'appui à la recherche ; pour être une aide au transfert et à l'innovation, et être un appui à l'industrie et aux start-ups ; pour avoir une activité de formation sur des moyens réels (étudiants, valorisation d'acquis d'expériences).

La plateforme PV de caractérisation est localisée au laboratoire PROMES et a été entièrement réalisée par l'équipe de recherche. Elle comprend deux systèmes de mesures de courbes I-V, un fixe (d'une puissance de 1,5kW) couplé à un tracker deux axes (asservi en fonction de la position) et un transportable (d'une puissance de 800W) pour du test sur site disant. Le système de stockage de l'information mesurée a été mis en place avec le service informatique du laboratoire.

La deuxième partie de la plateforme est localisée à Rivesaltes. Elle reprend la partie qui a été réalisée pour la thèse d'Emilien Duverger avec ENGIE-GREEN. À savoir, les 3 blocs PV de 20kW et les onduleurs associés, le pack de batterie lithium-ion de 90kW et son système de recharge, l'interconnexion avec le réseau et le système de supervision reconfigurable et le contrôle à distance. L'objectif est de pouvoir tester, du composant industrialisable (systèmes de mesure, conversion), mais aussi des algorithmes de contrôle d'énergie pour des micro-grids. Les termes légaux d'utilisation et l'ouverture à d'autres entités sont en cours de discussion entre le CNRS et ENGIE-GREEN. Pour l'instant, le véhicule électrique et la charge sont exclus des discussions car utilisés par l'entreprise qui exploite le site.



Figure 15: Système de caractérisation I-V transportable développé par l'équipe d'une puissance de 800W.

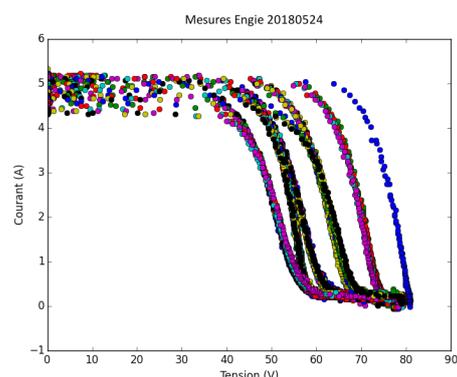


Figure 16: Exemple de mesures contenues dans la base de données.

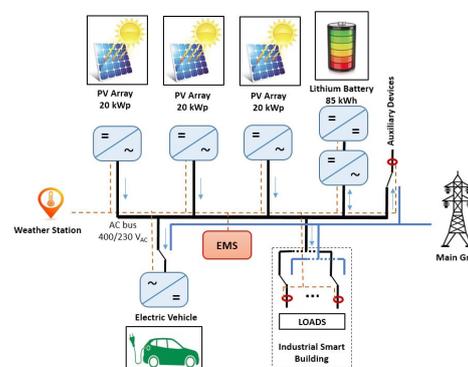


Figure 17: Architecture électrique de la plateforme smart-grid.

# - Infrastructure de Recherche FR-SOLARIS -



## Présentation

L'infrastructure FR-SOLARIS, indissociable du laboratoire PROMES, est une Infrastructure de Recherche officiellement inscrite dans la feuille de route des infrastructures de recherche françaises depuis 2016. Elle regroupe les principaux équipements et moyens de recherche nationaux sur le solaire thermique à concentration : installations solaires du CNRS à Odeillo et centrale solaire Thémis (propriété du Conseil Départemental des Pyrénées Orientales) à Targassonne.

FR-SOLARIS offre 4 grandes familles d'équipements (avec leur environnement) :

- 12 fours solaires dont 1 four solaire de 1 MWth et 11 fours solaires de petite/moyenne puissance (1 à 6 kWth) ;
- 1 concentrateur parabolique de 50 kWth ;
- 1 microcentrale cylindro-parabolique de 150 kWth ;
- 1 concentrateur à tour de 5 MWth.

L'Equipex SOCRATE a permis la jouvence et la mise à niveau de certains équipements, voire leur acquisition dans le cas de la microcentrale cylindro-parabolique (MicroSol-R) ou encore de certains appareillages de caractérisation optique et thermique rattachés aujourd'hui à la Plateforme de Caractérisation des Matériaux (PCM-POT). Les grands équipements de FR-SOLARIS sont décrits un peu plus loin dans le rapport du Service des Installations Solaires et Instruments Associés (SISIA).

## Mission et services

La principale mission de FR-SOLARIS est d'offrir à la communauté scientifique nationale et internationale des moyens d'essais, concentrateurs solaires et instrumentation associée, nécessaires au développement des recherches scientifiques et

technologiques sur le solaire thermique à concentration. Les principaux services offerts sont la mise à disposition des équipements, la réalisation de mesures et tests à haute température (jusqu'à 3000°C), la définition et la réalisation de projets collaboratifs, l'assistance à la mise en place d'une instrumentation adaptée aux systèmes à concentration, la qualification de composants solaires, les tests de vieillissement accéléré sous irradiation solaire. Dans le cadre des projets européens d'Infrastructure SFERA (Solar Facilities for the European Research Area), une dizaine d'équipes de chercheurs étrangers sont accueillies chaque année pour la réalisation d'expériences utilisant les installations solaires de FR-SOLARIS.

## Organisation

Le directoire de FR-SOLARIS est composé de A. Dollet (Responsable de l'IR), M. Balat-Pichelin, N. Autonès (Administratrice et Référente "Coûts Complets"), E. Guillot (Responsable Technique et Chargé de Relations Industrielles). Le management opérationnel des installations qui composent l'Infrastructure est assuré par le service SISIA (voir présentation plus loin).

## Contexte international

FR-SOLARIS est le nœud français du projet d'infrastructure européenne distribuée EU-SOLARIS (<http://www.eusolaris.eu/>) sur le solaire à concentration qui rassemble 8 pays : Allemagne, Chypre, Espagne, France, Grèce, Italie, Portugal, Turquie. Le projet EU-SOLARIS est dans la feuille de route ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) depuis 2010 : l'infrastructure pourrait être créée en 2021 avec une structure légale basée en Espagne. Il s'agirait alors de la plus grande infrastructure de recherche sur le solaire thermique concentré à l'échelle mondiale.



# SERVICES



91 > 98

PCM



99 > 106

SISIA





## Présentation du service

Responsable : E. Beche (IR CNRS)

### **ASI: Analyses de Surfaces et Interfaces**

S. Eichendorff (T CNRS), E. Beche (IR CNRS)

### **POT: Propriétés Optiques et Thermiques**

C. Escape (IE CNRS)

### **PM-IS: Propriétés Mécaniques Imagerie de Surfaces**

H. Glénat (AI CNRS)

### Mots clés

(Optical, thermal, mechanical, microstructural) characterizations

### Références

22, 23, 24, 79, 80, 87, 92, 118, 126, 139, 177, 198, 205, 221, 230, 249, 250, 260, 315, 370, 397, 409, 584, 585, 603, 613, 622, 623, 624, 661, 678, 708, 709, 711, 712, 716

- en bref -



### **ÉQUIPEMENTS**

**ASI:** Spectromètre photoélectrons et électrons Auger (XPS-AES); Diffractomètre de RX (DRX); Spectromètre Raman; Granulomètre laser

**OTP:** Spectrophotomètre NIR-IR; Spectrophotomètre UV-Vis-NIR; Diffusivimètre LaserFlash; Appareil CASI

**PM-IS:** Microscope Force Atomique (AFM); Profilomètre de contact; Nano-indenteur; Tribomètre alternatif

### **COLLABORATIONS**

70 % équipes de recherche du laboratoire PROMES (Projets européens : SFERA, SOLSTICE, POLYPHEM, RAISELife, NESTER) Projets nationaux ANR...); 30 % équipes de recherche et plateformes extérieures (KTH Royal Institute of Technology de Stockholm, CIRIMAT, LCC (Toulouse), ICGM, IEM (Montpellier), IRCER (Limoges), ICA (Albi), INSA, CETHIL (Lyon), ICCF (Clermont-Ferrand) CEMTHI (Orléans) IMN (Nantes), et industriels (Aérospatial, énergie, métallurgie...)

## • Rapport Scientifique •

### Introduction

La Plateforme de Caractérisation des Matériaux (PCM) est issue d'un regroupement en juin 2017 de 3 entités de service (ASI, OTP et PM-IS).

#### Nos Missions

- Atteindre un haut niveau de professionnalisme dans nos études sur la microstructure et les propriétés des matériaux.
- Apporter un niveau de formation d'excellence dans le domaine de la caractérisation et la mesure des propriétés physico-chimiques des matériaux.

#### Notre politique qualité

- Garantir aux utilisateurs la fiabilité et la traçabilité des résultats mesurables.
- Garantir une qualité de formation des personnels du laboratoire PROMES et d'autres EPST.
- Garantir au laboratoire une capitalisation et un partage des savoir-faire.

- Garantir au laboratoire une valorisation scientifique des études réalisées sur la plateforme.

#### Nos Objectifs

- Optimiser le développement des appareillages et des méthodes.
- Collaborer à des actions de recherche initiées par les chercheurs du laboratoire dans des projets nationaux (ANR...) et internationaux (programmes de recherche européens).
- Réaliser des missions d'expertise dans des comités nationaux (Comité Spectroscopies d'Electrons de la Société Française du vide...) et sur des plateformes nationales (Montpellier, Toulouse, Limoges...).

## Equipements PCM-ASI

### SPECTROSCOPIES DE PHOTOÉLECTRONS ET D'ÉLECTRONS AUGER (XPS-AES)

FichIden\_PCM-ASI\_APP\_XPS01

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

#### Appareillages et mise en œuvre sur des plateformes régionales

##### Informations recherchées

- Détermination de la composition atomique, profils de concentration en profondeur
- Détermination de la nature des liaisons chimiques et des environnements atomiques
- Caractérisation de la structure électronique des matériaux : hybridation et densité d'état des orbitales atomiques, degrés d'oxydation des éléments
- Calcul des épaisseurs des couches de surface
- Mise en œuvre d'analyses d'extrême surface (analyse angulaire)

sur des matériaux massifs ou poudres (céramiques, oxydes mixtes, alliages...)



### DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)

FichIden\_PCM-ASI\_APP\_XPS01

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Diffractomètre de Rayons X (DRX03) (2011)

Modèle : X'Pert PRO MPD (ø-ø)

Fabriquant : PANalytical



#### Informations recherchées

- **Identification de phases cristallines**
- Modélisation d'un profil de raie
- Quantification des phases cristallines (méthode Rietveld), d'une phase amorphe
- Calcul des paramètres de structure cristalline
- Détermination du taux de substitution sur un site atomique, d'une orientation préférentielle, d'une taille de grain, d'un taux de micro-contrainte...

**sur des matériaux cristallisés massifs ou poudres (céramiques, oxydes mixtes, alliages...)**

### SPECTROMÉTRIE RAMAN

FichIden\_PCM-ASI\_APP\_RAM01

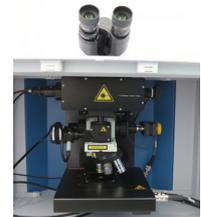
Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Spectromètre Raman (RAM01) (2016)

Modèle : LabRAM\_HR\_Evolution

Fabriquant : HORIBA



#### Informations recherchées

- Détermination de la composition, des phases chimiques d'un matériau
- Réalisation d'imagerie 2D (surface), 3D (volume) : Mise en œuvre de profils en (z) et (x, y)
- Identification de la microstructure de surface et des défauts intrinsèques
- Etude de l'évolution des modes de vibration des liaisons chimiques

**sur des matériaux massifs ou poudres (céramiques, oxydes mixtes, alliages...)**

### GRANULOMÉTRIE LASER

FichIden\_PCM-ASI\_APP\_GRANU01

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Granulomètre Laser (GRANU01) (2018)

Modèle : Mastersizer 3000

Fabriquant : MALVERN



#### Informations recherchées

- Détermination de la distribution de taille de particules de poudres (céramiques, oxydes mixtes...)
- Choix du modèle de fit pour les courbes de distribution de tailles sur des poudres (céramiques, oxydes mixtes, alliages...)

**sur des poudres (céramiques, oxydes mixtes, alliages...)**

## Equipements PCM-OTP

### SPECTROSCOPIE NIR-IR

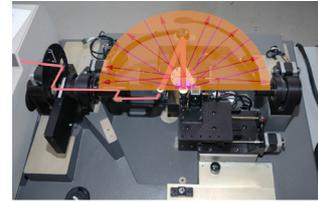
FichIden\_PCM-OTP\_APP\_xxxx

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Spectrophotomètre NIR-IR (1.5  $\mu\text{m}$ -25  $\mu\text{m}$ ) (2013)

Modèle et fabricant : SOC100 HDR + Nicolet 6700, SOC et Thermo-Electron



### Informations recherchées

#### Mesures spectrales hémisphérique (réflectivité, transmittivité, émissivité...)

- Réflectivité hémisphérique directionnelle
- Composantes diffuses et spéculaires de la réflectivité
- Transmittivité hémisphérique directionnelle
- Comportement diffus de la transmittivité
- Emissivité spectrale directionnelle et totale directionnelle

sur des échantillons solides 293 K < T < 800 K (mesures de réflectivité seulement)

### SPECTROSCOPIE UV-VIS-NIR

FichIden\_PCM-OTP\_APP\_xxxx

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type: Spectrophotomètre UV-Vis-NIR (250nm-2500nm) (2016)

Modèle et fabricant : Lambda 950 + sphere PELA150mm +TAMS, Perkin Elmer



### Informations recherchées

#### Mesures spectrales normale hémisphérique et angulaire (réflectivité, transmittivité, émissivité...)

- Réflectivité spectrale normale hémisphérique sur sphère intégrante 150mm
- Composantes diffuses et spéculaires
- Transmittivité normale hémisphérique
- Mesures de réflectivité angulaire (BRDF BTDF) sur accessoire TAMS
- Réflectivités de +/-7.5° jusqu'à +/-80°

sur des échantillons solides à température ambiante

### DIFFUSIMÉTRIE THERMIQUE

FichIden\_PCM-OTP\_APP\_xxxx

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Diffusivimètre LaserFlash Analysis (2012)

Modèle et fabricant : LFA 457, NETZSCH



### Informations recherchées

- Diffusivité thermique en absolue de T ambiante  $\rightarrow$  1100°C
- Obtention possible de la conductivité thermique moyennant hypothèses
- Cyclages de montées et descentes en température de l'échantillon °

sur des échantillons solides ou poudres



### RÉFLECTIVITÉ ET TRANSMITIVITÉ BIDIRECTIONNELLE BRDF-BTDF

FichIden\_PCM-OTP\_APP\_xxxx

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Complete Angle Scatter Instrument (2013)

Modèle et fabricant : CASI, SMS Schmitt



Resolution: 0.001 degrees , 0.01 mm linear - Accuracy: 0.05 degrees , 0.01mm linear  
Incident Angle Range: 0-85 degrees - Receiver Angle Range: 360 degrees

#### Informations recherchées

##### Mesures de la fonction de distribution de la réflectivité bidirectionnelle

- BRDF (fonction de distribution de la réflectivité bi-directionnelle),
- BTDF (fonction de distribution de la transmittivité bi-directionnelle) à 628 nm.
- Qualité optique de réflecteurs.
- Quantification de la dispersion de lumière incidente sur un matériau

sur des échantillons solides

## Equipements PCM-PM-IS

### MICROSCOPIE À FORCE ATOMIQUE (AFM)

FichIden\_PCM-PM\_APP\_AFM

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Microscope à force atomique (2002)

Modèle et fabricant : Smena, NT-MDT (Russie)



#### Informations recherchées

##### Caractérisation des états de surface à l'échelle nanométrique

- Le relief et la morphologie des surfaces
- Les paramètres d'états de surface
- La détermination du travail d'adhésion de Dupré à partir des courbes de force
- Les mesures capacitives par microscopie à force électrostatique (mode EFM)
- L'évaluation du travail de sortie par microscopie à sonde de Kelvin (mode KPFM)
- Les cartographies de propriétés spécifiques de surface (électrique, magnétique, mécanique...)

sur tous types de matériaux (isolants, conducteurs, polymères, organiques...) dont la géométrie de la surface est compatible avec l'échelle de la mesure AFM

### PROFILOMÉTRIE MÉCANIQUE DE CONTACT À STYLET

FichIden\_PCM-PM-IS\_APP\_Profilo

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Profilomètre à contact mécanique à stylet (2012)

Modèle et fabricant : DEKTAK XT, Bruker



#### Informations recherchées

##### Imagerie 3D associée à la caractérisation des états de surface

- Topographie des surfaces
- Séparation des écarts géométriques entre l'ondulation et la rugosité
- Les paramètres d'amplitude et d'espacement, la mesure d'épaisseur, les paramètres liés à la courbe de taux de longueur portante...
- La contrainte résiduelle dans une couche mince par la mesure de la variation de courbure

sur tous les types de surfaces de faible à forte rugosités

**NANO-INDENTATION****FichIden\_PCM-PM-IS\_APP\_Nano**

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type : Nano-indenteur (1989)

Modèle et fabricant : Nano Indenter II, Nano Instruments, Inc. (USA)

**Informations recherchées****Propriétés mécaniques des matériaux aux échelles submicroniques**

- La résistance à la déformation plastique,
  - Les constantes élastiques,
  - Le comportement au fluage par modélisation,
  - La ténacité des matériaux à l'aide de méthodes analytiques
  - L'adhérence d'un revêtement (ou d'une interphase) : Estimation du taux de restitution de l'énergie critique
- sur des matériaux céramiques, verres, métalliques, polymères, sous la forme monolithique, polyphasée, de couches minces...**

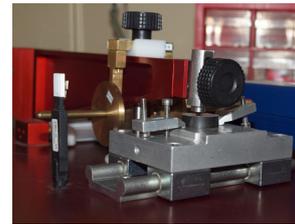
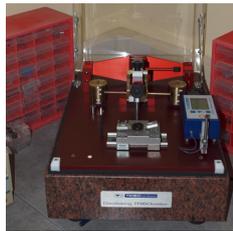
**TRIBOLOGIE****FichIden\_PCM-PM-IS\_APP\_Nano**

Date d'application : 2017-04-01

Indice A

Type: Tribomètre alternatif (2007)

Modèle et fabricant : TRIBOtester, TRIBOtechnic

**Informations recherchées****Propriétés tribologiques**

- Coefficient de frottement dynamique
  - Taux d'usure
  - Puissance dissipée sous forme de chaleur au cours du frottement
  - Perte énergétique due au frottement
  - Mécanismes d'usures
- sur matériaux céramiques, métaux et alliages, polymères, lubrifiants et additifs**



## ETUDE MULTI-ÉCHELLE DE LA MICROSTRUCTURE DE PAROIS DE PORES DE MOUSSES CÉRAMIQUES (Si-ZrB<sub>2</sub> ET SiC-SiC) TRAITÉES À HAUTES TEMPÉRATURES : OPTIMISATION DE MÉTHODES SPÉCIFIQUES D'ANALYSES

Des méthodes d'analyses microstructurales ont été optimisées (supports d'échantillons adaptés, tailles de sources, surface et volume analytiques adaptés à la forme des pores, effets d'irradiation...).

La microstructure des parois de pores de mousses céramiques (Si-ZrB<sub>2</sub> et SiC-SiC..) a été étudiée après un traitement thermique par voie solaire (T<1400 K). Notre travail a permis de déterminer les propriétés de surface et d'évaluer les performances et le comportement à l'oxydation de ces matériaux poreux. Nos résultats ont conduit à sélectionner les techniques appropriées pour analyser la paroi à géométrie variable d'une cavité (informations de surface et en masse) et à qualifier les candidats prometteurs pour des absorbeurs solaires volumétriques à hautes températures.

Ce travail a été soutenu par le programme européen SFERA II (FP7-INFRA, N° 312643, WP13-T3A).

Figure 1a : Photographie d'un échantillon de mousse céramique Si-ZrB<sub>2</sub> (T<1400 K)

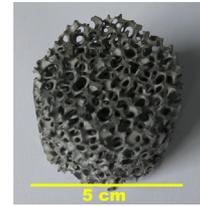


Figure 1a

Figure 1b : Profils AES réalisés sur un échantillon de mousse céramique Si-ZrB<sub>2</sub> (T<1400 K)

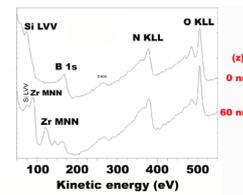


Figure 1b

Figure 1c : Spectres Raman collectés à différentes tailles du trou confocal (50, 100 et 200 microns): Échantillon de mousse céramique Si-ZrB<sub>2</sub> (T<1400 K)

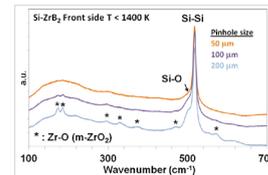


Figure 1c

Figure 1d : Image MEB d'une coupe transversale, réalisée sur la paroi d'un pore d'une mousse céramique Si-ZrB<sub>2</sub> (T<1400 K)

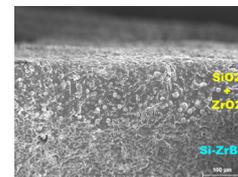


Figure 1d

## MESURES SPECTRALES SUR DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES THERMORÉGULÉES

Le service PCM-OTP participe régulièrement à des campagnes d'inter comparaisons de mesures entre laboratoires européens (9 participants). Après comparaison des mesures spectrales de réflectivité, notre service est parmi les 3 laboratoires à moins de 3% d'écart moyen avec le laboratoire de référence.

Le service a développé et proposé une solution pour la mesure de luminescence de cellules photovoltaïques (fig.2,3). Le résultat majeur fut la mise en évidence sur un spectrophotomètre des éléments constitutifs d'une cellule en fonction du courant injecté. Nous avons défini le cahier des charges, suivi la fabrication, développé sous LabView un logiciel de régulation de température par effet Peltier. Le protocole de mesures sur le spectrophotomètre, les fabrications et le code offrent un développement unique disponible pour la communauté scientifique.

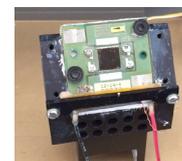


Figure 2 : Régulateur de température de cellule par effet Peltier

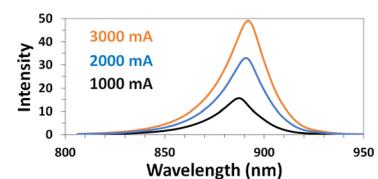


Figure 3 : Spectres d'électroluminescence d'une cellule PV en réponse à 3 injections de courant

## CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DE RUPTURE ADHÉSIVE ET COHÉSIVE DE COUCHES MINCES SiCN:H (PACVD)

La performance des composants revêtus dépend de leur composition, de leur microstructure, et des caractéristiques du revêtement parmi lesquelles il convient de citer ses propriétés mécaniques et son adhésion au substrat. Pour caractériser finement ces propriétés, nous développons et mettons en œuvre des méthodes d'analyse appropriées à partir d'essais de nano-indentation. Pour déterminer les propriétés de rupture des couches minces, il a été mis en œuvre une approche basée sur l'énergie dissipée irréversiblement au cours de la nano-indentation. En traçant l'énergie dissipée en fonction de la charge maximale appliquée (Fig.4), il est possible de séparer les deux événements qui se produisent au cours de la nano-indentation, le premier correspondant à l'énergie dissipée par la delamination (Fig.5), le second à celle dissipée par l'écaillage de la couche (Fig.6). Une mesure du taux critique de restitution de l'énergie, respectivement de l'interface et de la couche est obtenue (Fig.7).

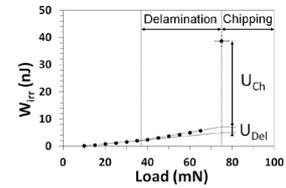


Figure 4

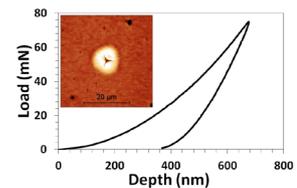


Figure 5

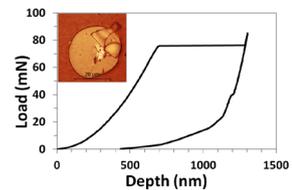


Figure 6

Figure 4 : Energie dissipée irréversiblement en fonction de la charge appliquée (T élaboration=500°C)

Figure 5 : Image optique + Courbe de charge-déplacement associées à la delamination de la couche

Figure 6 : Image optique + Courbe de charge-déplacement associées à l'écaillage de la couche

Figure 7 : Taux critique de restitution de l'énergie (température d'élaboration=20, 300, 500°C)

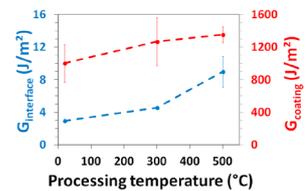
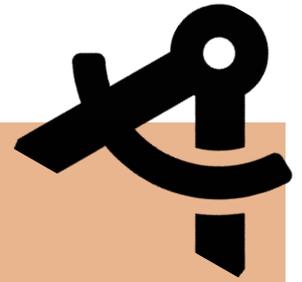


Figure 7



# Présentation du service

Responsable : E. Guillot (IR1 CNRS)

Permanents : W. Baltus (TCS CNRS), N. Boulet (IEHC CNRS), A. Perez (AI CNRS), R. Rodriguez (TCE CNRS), JL. Sans (IR1 CNRS), M.Tessonnaud (TCN CNRS), Y. Volut (IR CNRS)

Non permanents : A.Badziaka (IE en temps partagé avec le service administratif). Egalement sur la période 2016-2019 : Alexis Cros, Florent Lecat)

### ÉQUIPEMENTS

- *Grand Four Solaire d'Odeillo de 1000 kW et 10000 kW/m<sup>2</sup> : parabole fixe de 1830 m<sup>2</sup>, champ de 63 miroirs mobiles pour un total de 2835 m<sup>2</sup>, tour foyer pour expérimentations jusqu'à 20 tonnes et 70 m<sup>3</sup>.*
- *Tour solaire de Thémis de 4500 kW : champ de 107 miroirs concentrateurs mobiles pour un total de 5800 m<sup>2</sup>, tour de 110m pour accueillir simultanément 2 expérimentations jusqu'à 70 tonnes et 400 m<sup>3</sup>.*
- *Fours solaires des Verticales : 2 groupes de 4 paraboles de 1 et 1.5kW pour 15000 kW/m<sup>2</sup>, une parabole de 6 kW et 6000kW/m<sup>2</sup>, 3 héliostats de 27m<sup>2</sup> chacun pour desservir ces concentrateurs.*
- *Fours solaires du Bastion : 2 paraboles de 1.5kW et 16000 kW/m<sup>2</sup>, leurs 2 héliostats de 9m<sup>2</sup>.*
- *Microcentrale solaire MicroSol'R de 150 kW avec 3 circuits: huile, vapeur et eau froide par dry-cooler. Stockages thermiques de l'huile en thermocline et en double cuve, production électrique par ORC.*
- *Parabole EuroDish de 50 kW et son moteur Stirling pour la production électrique.*
- *Instrumentation lourde : spectroradiomètre, stations météo à Odeillo et à Thémis.*
- *Chariot élévateur d'une capacité de 4t, nacelle élévatrice télescopique de 13m.*

- en bref -



### COLLABORATIONS

CIEMAT-PSA, DLR, SPCTS-CNRS, CEA

## • Rapport Scientifique •

### Introduction

Le Service des Installations Solaires et Instruments Associés (SISIA) a 3 missions : assurer 1) le fonctionnement, 2) le développement et 3) la connaissance des installations solaires du laboratoire. À celles-ci s'ajoute la logique mission d'interface et d'accueil des équipes des projets hébergés, issues du laboratoire ou venant du Monde entier.

Afin d'assurer ces missions, les compétences et l'expérience des membres du service couvrent à différents niveaux tous les aspects correspondants : mécanique, électrotechnique, instrumentation. Certains développements sont faits en comparaison avec les autres plateformes similaires européennes, dont la plateforme solaire d'Almeria (CIEMAT-PSA, Espagne) et le four solaire du DLR à Cologne.

Les installations solaires du laboratoire constituent un ensemble d'équipement sans équivalent au Monde en termes de diversité et de possibilités, le fleuron étant le Grand Four Solaire d'Odeillo. Cet ensemble d'installations optiques de grande taille couvre tous les domaines de recherche du solaire à concentration :

- Des basses aux hautes puissances : de 0,8kWth à plus de 4500 kWth.
- Des bas aux hauts flux radiatifs : de 25 kW/m<sup>2</sup> à plus de 16000 kW/m<sup>2</sup>.

Le Service des Installations Solaires et Instruments Associés (SISIA) assure 3 missions principales vis-à-vis de cet ensemble :

- Assurer le fonctionnement des installations solaires du laboratoire : organisation, maintenance.
- Déterminer les capacités des installations solaires du laboratoire : mesure des performances.
- Développer les possibilités des installations solaires du laboratoire : valorisation, conception.

En complément, le SISIA assure 2 missions corollaires :

- Assurer l'interface entre les installations, leurs instruments liés et les utilisateurs, internes ou externes au laboratoire : formation, participation à des projets, valorisation médiatique.

- Développer des instruments et des équipements pour les conditions d'emploi spécifiques aux installations solaires : conception, métrologie.

Afin d'assurer ces missions, les compétences et l'expérience des membres du service couvrent à différents niveaux tous les aspects correspondants, principalement : électrotechnique, instrumentation optique (mesures de température et de flux radiatif), automatique, mécanique, gestion projet, gestion de la maintenance.

Sur la période 2016-2019, les principales réalisations par les équipes du SISIA, en dehors de participations à des projets de recherche du laboratoire, ont été la création de la centrale MicroSol'R (Equipex SOCRATE, 1.8 M€), la conception et le remplacement du système contrôle commande des héliostats du Grand Four d'Odeillo (Equipex SOCRATE, 0.9 M€), la rénovation de la mécanique, de l'optique et du pilotage de ceux à Thémis, le développement de la mesure spectrale angulaire de l'émissivité sur MEDIASE (projet FP7 SFERA-II), le développement d'un pyro-réfectomètre bicolore solarblind (projet FP7 SFERA-II et Labex SOLSTICE), la mesure du flux solaire concentré au foyer des installations solaires du laboratoire (plusieurs instruments développés à base de radiomètres et/ou de caméras).

Le service est organisé en 2 équipes pluridisciplinaires coordonnées indépendamment en règle générale : une sur le site d'Odeillo, une sur le site de Thémis. Selon les projets de recherche, des contractuels peuvent être rattachés à ces équipes, ou le plus souvent des membres du SISIA sont inclus à temps partiel aux projets (FP7, H2020, ANR, contrats).

Chaque installation solaire a un responsable chargé d'en piloter l'organisation dont le planning (équipes de recherche, maintenance, développement des performances et des services d'accueil) et la valorisation (prospection et discussion avec des utilisateurs potentiels), en lien direct avec tous les autres services du PROMES et si nécessaire avec la direction du laboratoire et les services de la DR13.



## Installations solaires

### GRAND FOUR SOLAIRE (RESPONSABLE : J.-L. SANS)

Le Grand Four Solaire d'Odeillo, mis complètement en service en 1972, est constitué d'un champ de 63 héliostats de 45m<sup>2</sup> chacun (pour un total de 2835m<sup>2</sup> de miroirs plans) qui collectent l'énergie solaire pour la renvoyer vers la parabole de 9700 facettes (pour un total de 1830m<sup>2</sup> de miroirs courbes) qui la concentre sur les expérimentations où est disponible jusqu'à 1000 kWth et 10000 kW/m<sup>2</sup>, modulables, permettant d'atteindre 3500°C.

Cette installation est utilisée principalement pour la recherche sur les matériaux et pour le test de nouveaux procédés de valorisation de l'énergie solaire destinée à des centrales solaires à tour :

- Projets SolPart, PartiSun, CSP2, accueils via SFERA-II et SFERA-III.
- Contrats CNES, ESA, NASA.

C'est l'installation solaire la plus sollicitée du laboratoire, avec plus d'un an d'attente en moyenne, pour des campagnes expérimentales de 2 à 16 semaines habituellement.

L'Equipex SOCRATE a permis d'assurer une jouvence du Grand Four :

- Rénovation du contrôle commande des 63 héliostats pour améliorer les possibilités de modulation de la puissance et de la densité de puissance et la fiabilité de fonctionnement : remplacement des motorisations, des infrastructures d'alimentation électrique et de communication, développement de nouveaux logiciels de pilotage.
- Mise en service d'une source froide pour pratiquement supprimer la consommation d'eau utilisée pour le refroidissement des expérimentations.



Figure 1 : Grand Four Solaire d'Odeillo et certains de ses 63 héliostats.



Figure 2 : Chargement d'une expérimentation au Grand Four Solaire d'Odeillo par chariot élévateur.

### SITE DE THÉMIS DONT LA TOUR SOLAIRE (RESPONSABLE : Y. VOLUT)

Le laboratoire est le locataire exclusif de la tour de Thémis et utilise 107 héliostats après les avoir rénovés. Les héliostats permettent de collecter l'énergie solaire pour la focaliser en haut de la tour, soit sur l'emplacement d'origine qui est utilisé pour le projet H2020 Next-CSP, soit sur le nouvel emplacement Mini-Pégase créé par le laboratoire, utilisé pour le projet H2020 POLYPHEM et précédemment plusieurs contrats de l'équipe TRECS.

Cette installation est utilisée depuis sa remise en service par le laboratoire pour le test de boucles de production d'électricité pour centrales à tour : récepteurs solaires innovants, turbines solarisées, fonctionnement et maintenance de champs d'héliostats.



Figure 3 : Centrale solaire à tour solaire de Thémis et son champ d'héliostats (dont plusieurs endommagés par la grêle du 15 juin 2017, ici avant le remplacement des miroirs cassés).

### CYLINDRO-PARABOLIQUE MICROSOL'R (RESPONSABLE : N. BOULLET)

La microcentrale MicroSol'R est la dernière installation solaire créée au laboratoire grâce à l'Equipex SOCRATE. Il s'agit d'un ensemble de 3 concentrateurs cylindro-paraboliques avec 2 orientations différentes et d'une boucle thermique complète dédiée de production de vapeur avec 2 systèmes de stockage thermique d'huile sous pression atmosphérique et un système de production d'électricité par cycle organique de Rankine. Cette installation a été conçue pour travailler sur le stockage thermique, la modélisation de centrales complètes, le test de nouveaux tubes récepteurs, la formation d'étudiants.

Via les projets SFERA, le SISIA a également accueilli sur le site des équipes espagnoles, anglaises et italiennes qui ont travaillé sur l'optique des héliostats et le suivi solaire.



Figure 4 : Cylindro-parabolique MicroSol'R : les concentrateurs au premier plan, le bâtiment machinerie et la salle de contrôle partagée avec l'EuroDish derrière.

### PETITES PARABOLES DES VERTICALES (RESPONSABLE : E. GUILLOT)

Les installations verticales sont constituées de 3 héliostats renvoyant l'énergie solaire vers un total de 9 paraboles à axe vertical et autant de postes de travail :

- 1 parabole sphérique à facettes de type Davis-Cotton de 4 m pour 6 kWth et 6000 kW/m<sup>2</sup> avec modulateur d'énergie solaire.
- 4 paraboles monoblocs de type Zeiss de 2 m pour 1,5 kWth et 15000kW/m<sup>2</sup>, chacune avec modulateur d'énergie solaire SÉSAME.
- 4 paraboles monoblocs de type Zeiss de 1,5 m pour 0,85 kWth et 15000 kW/m<sup>2</sup>, chacune avec modulateur d'énergie solaire SÉSAME.
- Un ensemble d'équipements spécifiques dédiés : systèmes de positionnements motorisés des dispositifs expérimentaux, 3 enceintes en atmosphère contrôlée, pompes à vide...
- Des instruments spécifiques pour la mesure du flux concentré : calorimètres, caméras, cibles.



Figure 5 : Caractérisation thermique de céramique avec l'un des fours solaires des Verticales.

Un total de 31 paraboles du même type Zeiss de 1.5 m ou 2 m datant de la Seconde Guerre mondiale sont en stock, toutes dans un état optique correct à mauvais, permettant garantir à « moindre coût » une pérennité de service, et 4 autres paraboles sont prêtées à l'exposition grand public du laboratoire.

Ces installations sont celles qui accueillent le plus d'équipes de recherche, du laboratoire ou externes notamment via les projets SFERA : environ 150 semaines de tir solaire par an, réparties sur les 9 installations.

Les recherches couvrent un très large spectre : synthèse de nouveaux matériaux, dépôts de revêtements, tests thermiques, conversion chimique, conversion électrique... C'est également prioritairement sur ces installations que nous accueillons les étudiants et les journalistes pour les sensibiliser aux potentiels de l'énergie solaire concentrée et les recherches solaires menées au laboratoire.



Figure 6 : Mesures directionnelles de réflectivité solaire avec DISCO au Bastion.

## PETITES PARABOLES DU BASTION (RESPONSABLE : E. GUILLOT)

Les installations verticales sont constituées de 2 héliostats de 9m<sup>2</sup> renvoyant l'énergie solaire vers deux paraboles monoblocs type Zeiss de 2m à axe horizontal, pour 1,5 kWth et 16000 kW/m<sup>2</sup>. Les principaux auxiliaires sont les systèmes de positionnement des expérimentations, du contrôle de l'énergie solaire (modulateur Sésame) et des instruments spécifiques.

Les recherches menées avec ces équipements concernent notamment : caractérisation thermo-optique de matériaux, valorisation de l'énergie solaire avec des cycles thermo-chimiques, développement d'émission LASER par pompage solaire direct (équipe portugaise via accueil SFERA).

## PARABOLE EURODISH (RESPONSABLE : E. GUILLOT)

La parabole EuroDish pointe directement vers le soleil pour collecter 55 kWth et les concentrer pour obtenir jusqu'à 9500kW/m<sup>2</sup>. Cette parabole peut également être utilisée en tant que four solaire de 20 kWth en empruntant un héliostat du Grand Four situé juste à côté. L'installation inclut un système complet de production électrique par cycle Stirling.

La complexité actuelle de mise en service de l'installation et son foyer mobile non protégé des éléments extérieurs n'ont pas permis une utilisation de l'installation sur la période couverte par ce rapport.

## Instrumentation

**Pour des raisons opérationnelles (station météo) ou parce que les utilisateurs des installations solaires sont confrontés à des conditions d'utilisation spécifique non couvertes par des appareils commerciaux, le SISIA développe certains instruments et techniques d'instrumentation originaux.**

## MESURES MÉTÉO (RESPONSABLE : E. GUILLOT)

Afin d'assurer une évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité des recherches menées sur les installations solaires et pour celles concernées de déterminer les rendements de conversion énergétique, le SISIA met en œuvre les capteurs et équipements nécessaires : 5 pyréliomètres de classe I, 2 pyranomètres de classe I, 4 pyranomètres de classe II, 3 robots de suivi solaire, systèmes informatiques et logiciels dédiés, secours électrique, en coordination avec le service informatique et le service électricité du STAR. Le SISIA travaille également à l'exploitation de l'instrument SAM pour mieux déterminer l'énergie solaire réellement collectée : détermination du voile circumsolaire.

Le SISIA a collaboré avec la DLR et le CIEMAT à l'étalonnage de ces instruments dans le cadre du projet européen SFERA-II – WP11, ainsi qu'avec l'équipe COSMIC pour la prévision de la ressource : projets SFERA-III, SmartOccitania et CSIMP.

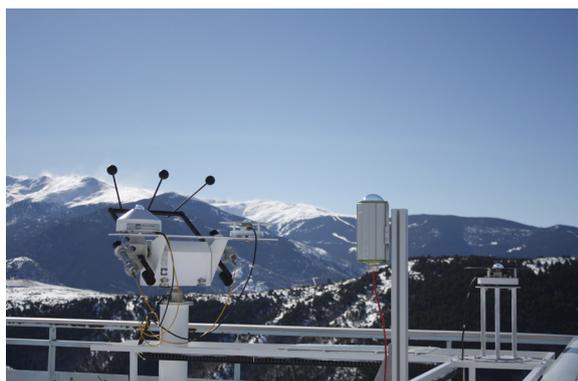


Figure 7 : Station météo principale d'Odeillo : pyréliomètres et pyranomètres sur robot de suivi solaire, caméra hémisphérique de suivi de nébulosité.

### MESURES DE TEMPÉRATURE (RESPONSABLE : J.-L. SANS)

La mesure de températures de surface est critique pour bon nombre d'expérimentations sur les installations solaires. Les appareils commerciaux standards ne sont pas utilisables dans de nombreux cas car ils sont perturbés par le rayonnement solaire concentré. Des équipes du laboratoire ont donc développé depuis le début du laboratoire des appareils spéciaux ou alors modifié des appareils commerciaux. Le SISIA poursuit aujourd'hui certains de ces développements ou adaptations (instruments et logiciels), notamment en matière de pyro-rélectométrie bicolore : un prototype solarblind a été conçu et testé (SFERA-II et Labex Solstice), et un instrument modernisé conçu et construit pour le CEA Cadarache.

Une technique de mesure de température originale par modulation de l'énergie radiative concentrée a été évaluée dans le cadre du projet européen SFERA-II (WP12) et d'une thèse au PSI (Suisse).



Figure 8 : Test d'un prototype de pyromètre bicolore « solarblind » au Bastion.

### MESURES DE PROPRIÉTÉS OPTIQUES (RESPONSABLE : J.-L. SANS)

Pour effectuer des mesures optiques de température ou pour déterminer les performances radiatives de matériaux, il est nécessaire de déterminer notamment les propriétés de réflectivité et d'émissivité. Le SISIA contribue aux activités du laboratoire dans ce domaine. Une amélioration des capacités sur le dispositif MEDIASE a été menée dans le cadre du projet européen SFERA-II (WP13, coordonné par le SISIA).

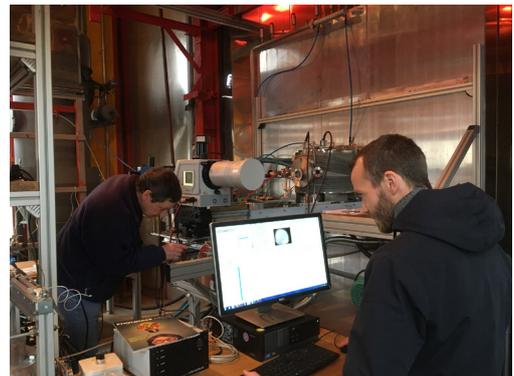


Figure 9 : Réglages du spectroradiomètre pour la détermination de l'émissivité directionnelle spectrale en température avec le dispositif MEDIASE au Grand Four d'Odeillo (projet Européen SFERA-II).

### MESURES DE FLUX SOLAIRE CONCENTRÉ (RESPONSABLES : E. GUILLOT (ODEILLO), Y. VOLUT (THÉMIS))

Afin d'assurer un suivi des performances des installations solaires et de déterminer l'énergie solaire injectée sur les expérimentations, il est nécessaire de déterminer la puissance et la répartition de la puissance dans l'espace où sont installées les expérimentations. Aucun appareil commercial ne permet des mesures correctes et fiables de ces paramètres pour les fours solaires du laboratoire car ils sont uniques au Monde et donc non couverts par le marché. Le laboratoire développe donc depuis son début des appareils adaptés, développements aujourd'hui poursuivis par le SISIA : calorimètres, système de cartographie par caméras avec cibles adaptées dont 3 barres de flux. Certains de ces instruments sont périodiquement évalués sur des domaines restreints avec les appareils proches développés par les autres laboratoires de recherche en Europe (DLR, CIEMAT, ENEA, DGA...). Les 2 dernières et la prochaine campagne de comparaison sont coordonnées par le SISIA dans le cadre des projets européens SFERA.

### VÉHICULES SPÉCIAUX

Le SISIA dispose d'un chariot élévateur de 4 tonnes pour la logistique à Odeillo et à Thémis, et l'hiver le déneigage sur le site d'Odeillo : financement 50 % Equipex Socrate, 50 % SISIA.

Le SISIA utilise également la nacelle élévatrice de 13m du laboratoire, principalement pour la maintenance des héliostats à Thémis et à Odeillo.

La maintenance de ces 2 appareils est en grande partie assurée par le SISIA, financièrement et/ou opérationnellement, en collaboration avec le STAR.



## Réalisations

### Principales réalisations du SISIA 2016 - 2019

#### ACCUEIL DE PROJETS DE RECHERCHES

- Hébergement de projets de recherche (hors Access SFERA) : 180 à 250 semaines de faisceau solaire par an toutes installations confondues.
- Access SFERA-II (2013-2017, FP7) : accueil d'une vingtaine d'équipes internationales pour un total de 72 semaines en 2016 et 2017.
- Access SFERA-III (2019-2023, FP7) : accueil de 7 équipes européennes pour un total de 16 semaines en 2019.

#### GROSSES OPÉRATIONS DE MAINTENANCE EXCEPTIONNELLE DES INSTALLATIONS SOLAIRES

- Poursuite de la rénovation mécanique des têtes des héliostats de Thémis.
- Remplacement des miroirs cassés à Thémis par la grêle de Juin 2017.
- Réfection des vérins de l'héliostat du 6kW des Verticales.

#### DÉVELOPPEMENT DES INSTALLATIONS SOLAIRES

- Mise en service de la microcentrale solaire MicroSol'R (Equipex SOCRATE 1.8 M€).
- Mise en service du nouveau contrôle commande des héliostats du Grand Four (Equipex SOCRATE, 0.9 M€) et début du déploiement sur les autres héliostats à Odeillo.
- Réglage optique des héliostats de Thémis (en collaboration avec les projets hébergés).
- Systèmes semi-automatiques de calibration du suivi solaire des héliostats à Thémis, au Grand Four d'Odeillo, et au 6 kW.
- Fin du déploiement des modulateurs de puissance SÉSAME sur tous les fours solaires des Verticales de 1,5 et 2 m.
- Installation d'un modulateur de puissance SÉSAME sur le four solaire Est du Bastion.
- Création et déploiement de consoles de pilotage standardisées sur tous les fours solaires des

Verticales de 1,5 et 2 m.

#### DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTS ASSOCIÉS

- Développement d'une méthode de détermination spectrale directionnelle de l'émissivité sur Médiase au Grand Four grâce à un nouveau spectroradiomètre et spectrophotomètre (SFERA-II, FP7)
- Développement et/ou mise en service de 2 barres de flux à Thémis, une pour chaque zone expérimentale, avec radiomètre, caméra, logiciel de traitement de données.
- Mise en service d'un banc de calorimétrie en boucle fermée thermostatée.
- Développement d'un pyro-réfectomètre solarblind (SFERA-II et Labex Solstice).
- Développement d'un pyro-réfectomètre pour le CEA Cadarache.
- Développement d'un système de détermination de stratégie de pointage dans une cavité par algorithme génétique adapté au Grand Four (projet H2020 SolPart).
- Modernisation de l'infrastructure de la station météo principale à Odeillo.

#### VALORISATION DES INSTALLATIONS SOLAIRES ET INSTRUMENTS ASSOCIÉS

- Participation aux activités de réseau des projets SFERA-II, SFERA-III et EU-Solaris : montage du projet SFERA-III, structuration d'EU-Solaris, organisation de 2 sessions de formation d'industriels sur les sites, participation ou organisation aux campagnes d'intercomparaison de fluxmétrie et de mesure d'émissivité...
- Une dizaine de publications avec des équipes hébergées par l'Access SFERA.
- Stand aux conférences SolarPaces 2017 (Chili) et 2018 (Maroc) : Equipex SOCRATE.
- Stand aux conférences SolarPaces 2016 (E.A.U) et 2019 (Corée du Sud) : SFERA-II et III



Figure 10 : Atelier SFERA-III de mesures optiques sur les héliostats de Thémis avec le Fraunhofer ISE (Allemagne) pour la formation d'industriels



## FAIT MARQUANT

# - Four solaire d'Odeillo, 50 ans de recherches -

En 2019, le laboratoire PROMES a fêté le 50ème anniversaire du grand four solaire d'Odeillo. Cette célébration coïncidait avec celle des 80 ans du CNRS.

Le grand four solaire d'Odeillo a été mis en service en 1969, après presque 7 années de travaux de construction (fig. 1). Le Chimiste Félix Trombe (fig 1), chercheur au CNRS et spécialiste des terres rares, en est le père fondateur. Avec Marc Foëx et Charlotte Henry La Blanchetais, il avait été l'un des pionniers des recherches sur la concentration solaire et les très hautes températures. Il avait été à l'origine de la construction d'un premier four solaire de 50 kWth à Mont-Louis en 1949.

La célébration du 50ème anniversaire du four solaire d'Odeillo a eu lieu à Odeillo et Font-Romeu du 13 au 18 juillet. L'objectif du laboratoire, qui a organisé cet évènement dans le cadre des célébrations des 80 ans du CNRS, était double :

- réunir des personnalités scientifiques et institutionnelles, avec les personnels du laboratoire, pour évoquer la recherche passée et présente au CNRS sur l'énergie solaire, et tout particulièrement la recherche conduite au four solaire d'Odeillo depuis 50 ans ;
- sensibiliser le grand public aux enjeux de l'énergie solaire et plus largement aux enjeux de la recherche scientifique en général.

Le 13 juillet, plusieurs milliers de personnes ont assisté à un spectacle audiovisuel (avec feu d'artifice tiré du four solaire) illustrant la création du CNRS et celle du four solaire (fig. 3) ;

- le 15 juillet, en présence du PDG du CNRS, plus de 150 invités, scientifiques et personnalités, ont évoqué l'histoire du CNRS et du four solaire d'Odeillo, ainsi que la recherche sur l'énergie solaire au CNRS.
- du 15 au 18 juillet, 7 conférences de chercheurs reconnus ont été proposées au grand public, ainsi qu'un débat, réunissant plus de 300 spectateurs au total. Le fil directeur des conférences pluridisciplinaires était le suivant : "Ils sont physicien/astrophysicien, thermicien, chimiste, biologiste, historien, sociologue : des personnalités scientifiques issues de différentes disciplines portent un regard croisé sur le soleil et l'énergie solaire".
- du 16 au 18 juillet, une dizaine d'ateliers de vulgarisation scientifique ont été organisés chaque jour (près de 30 séances au total) qui ont rassemblé près de 600 personnes. Plus de 350 personnes ont également participé à des visites guidées des installations solaires pendant ces 3 jours (fig. 2).

Tous les personnels du laboratoire : chercheurs et enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens, administratifs, doctorants, se sont fortement mobilisés pour cet évènement et ont rendu possible sa réussite.



Figure 1: à gauche, le four solaire d'Odeillo pendant sa construction;  
 au centre, le Four Solaire aujourd'hui;  
 à droite, portrait de Félix Trombe(1906-1985)



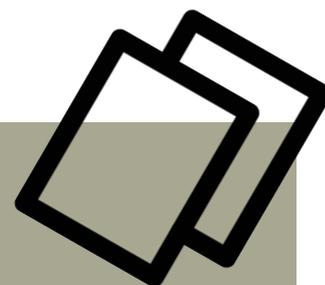
Figure 2: visite guidée du four solaire



Figure 3: le spectacle audiovisuel du 15 juillet 2019

# BIBLIOGRAPHIE

*Production scientifique 2016 - 2019*





## Publications dans des revues internationales à comité de lecture Papers in international journals

2016

1. ALAYA A., DJESSAS K., EL MIR L., K. KHIROUNI, Fabrication and Electrical Characterization of the Si/ZnO/ZnO:Al Structure Deposited by RF-Magnetron Sputtering, *J. Electron. Mater.* (2016), 45(10)
2. ANDRE L., ABANADES S., FLAMANT G. Screening of thermochemical systems based on solid-gas reversible reactions for high temperature solar thermal energy storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2016), 64, 703-715
3. ANDRE, P., COURTY, M.-A., KAGONE, A.K., KOALAGA, Z., KOHIO, N., ZOUGMORE, F., Calcul de la composition chimique dans un plasma issu de mélanges de PTFE, d'air, de cuivre et de vapeur d'eau dans le cadre d'appareillages de coupure électrique à air, *J. Int. Technol., Innov., Phys., Energie Environ.*, 2016, 2 (1) : 3.
4. AUSSEL D., CERVINKA M., MARECHAL M., Deregulated electricity markets with thermal losses and production bounds: models and optimality conditions, *RAIRO-Oper. Res.* 50 (2016) 19-38.
5. AUSSEL D., COTRINA J., IUSEM A., An existence result of quasi-equilibrium problem, *J. Convex Anal.* 4, 23 (2016).
6. AUSSEL D., GUPTA R., MEHRA A., Evolutionary Variational Inequality Formulation of Generalized Nash Equilibrium Problem, *J. Optim. Th. Appl.* 169 (2016), 74-90.
7. AUSSEL D., SULTANA A., VETRIVEL V., On the existence of projected solutions of quasi-variational inequalities and generalized Nash equilibrium problem, *J. Optim. Th. Appl.* 170 (2016), 818-837.
8. AYACHI F., BOULAWZ-KSAYER E., NEVEU P., ZOUGHAIB A., Experimental investigation and modeling of a hermetic scroll scroll expander, *Appl. Energy*, 181, 256-267, 2016
9. BALAT-PICHELIN M., IACONO J., BOUBERT P., Recombination coefficient of atomic oxygen on ceramic materials in a CO<sub>2</sub> plasma flow for the simulation of a Martian entry, *Ceram. Int.* 42(2), 2016, 2761-2769.
10. BASTARDIS R., DEJARDIN J.-L., VERNAY F., KACHKACHI H., « Ferromagnetic resonance of magnetostatically-coupled shifted chains of nanoparticles in an oblique magnetic field », *J. Appl. Phys.* 119, 174302 (2016)
11. BAZINETTE R., MASSINES F., Influence of the discharge mode on the optical and passivation properties of SiN<sub>x</sub>:H deposited by PECVD at atmospheric pressure, *Energy Procedia*, 92, 2016, 309-316
12. BAZINETTE R., PAILLOL J., MASSINES F., Atmospheric pressure radio-frequency DBD deposition of dense silicon dioxide thin film, *Plasma Processes and Polymers* 13 (10), pp. 1015-1024 (2016)
13. BAZINETTE R., PAILLOL J., MASSINES F., Transition from Townsend to radio-Frequency homogeneous dielectric barrier discharge in a Roll-to-Roll configuration, *J. Appl. Phys.* 119, 243304 (2016)
14. BELAID H., NOUIRI M., SAYARIA., BEN AYADI Z., DJESSAS K., EL MIR L., Temperature Dependent Electrical Transport in n-IZO/PS/p-Si and n-IZO/PS/n-Si Heterostructures Prepared by rf-Magnetron Sputtering, *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 11(6), 669-676, (2016)
15. BEN MARAI A., BEN BELGACEM J., BEN AYADI Z., DJESSAS K., ALAYA S., Structural and optical properties of CuIn<sub>1-x</sub>GaxSe<sub>2</sub> nanoparticles synthesized by solvothermal route, *J. Alloys Compds.* 658, 961-966, (2016)
16. BENOIT H., SPREAFICO L., GAUTHIER D., FLAMANT G. "Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, pp. 298-315, 2016.
17. BIZAU J.-M., CUBAYNES J., GUILBAUD S., EL EASSAN N., AL SHORMAN M. M., BOUISSET E., GUIGAND J., MOUSTIER O., MARIÉ A., NADAL E., ROBERT E., NICOLAS C., AND MIRON C., A merged-beam setup at SOLEIL dedicated to photoelectron-photoion coincidence studies on ionic species, *J. Electron Spectros. Relat. Phenom.*, 210, 5-12 (2016).
18. BOISVERT J.-S., MARGOT J., MASSINES F., Transition from Low Frequency to High Frequency of an Atmospheric-Pressure Dielectric Barrier Discharge in Helium, *Plasma Sources Science and Technology*, 26, p. 035004 (2016)
19. BOISVERT J.-S., MARGOT J., MASSINES F., Transitions Between Various Diffuse Discharge Modes in Atmospheric-Pressure Helium in the Medium-Frequency Range, *J. Phys. D.* 2016, 49, 32
20. BRIENZA M., MAHDI AHMED M., ESCANDE A., PLANTARD G., SCRANO L., CHIRON S., BUFO S., GOETZ V., Use of solar advanced oxidation processes for wastewater treatment: follow-up on degradation products, acute toxicity, genotoxicity and estrogenicity. *Chemosphere*, 148, 473-480, 2016.
21. BRODU E., BALAT-PICHELIN M., Emissivity of pBN and refractory metals for the Solar Probe plus mission, *J. Spacecrafts & Rockets* 53(6), 2016, Special Issue Materials Space Environment, 1119-1127.
22. CHARPENTIER L., LUCAS R., FOUCAUD S., GLENAT H., BALAT-PICHELIN M., Influence of surface roughness and temperature on the oxidation behavior of ZrC/SiC samples, *Ceram. Int.* 42(9), 2016, 10985-10991.
23. CURE J., PIETTRE K., COPPEL Y., BECHE E., ESVAN J., COLLIERE V., CHAUDRET B., FAU P., *Angew. Chem.*, 2016, 128, 3079-3082.
24. CURE J., PIETTRE K., COPPEL Y., BECHE E., ESVAN J., COLLIERE V., CHAUDRET B., FAU P., Solution Layer Deposition: a Technique for the Growth of Ultra-Pure Manganese Oxides on Silica at Room Temperature, *Angew. Chem. Int.*, 2016 55 (9) 3027-3030.
25. DE SOUSA MENESES D., BALAT-PICHELIN M., ROZENBAUM O., DEL CAMPO L., ECHEGUT P., Optical indices and transport scattering coefficient of pyrolytic boron nitride: a natural thermal barrier coating for solar shields, *J. Mat. Sci.* 51, 2016, 4660-4669.

26. DOLLET A., GRENIER J.C., JOUBERT O., LAMY C., CRETIN M., SISTAT P., DEMIRCI U.B., LATROCHE M., Preface to the special issue section dedicated to Prof. Gérald Pourcelly (University of Montpellier), for his significant contribution in the field of hydrogen, *Int. J. Hydrog. Energy*, 41(34) (2016) 15412-15414
27. FITO J., MAURAN S., MAZET N., STITOU D., CORONAS A., Solar-driven hybrid absorption-thermochemical refrigeration systems: Performance estimation. *Refrig. Sci. Technol.*, 1,407-414
28. GANGWAR R., LEVASSEUR O., NAUDE N., GHERARDI N., MASSINES F., MARGOT J., STAFFORD L., Determination of the electron temperature in plane-to-plane He dielectric barrier discharges at atmospheric pressure, *Plasma Sources Sci. Technol.* 25, 1 (2016)
29. GHRIBI F., EL MIR L., OMRI K., DJESSAS K., Sputtered ZnS thin film from nanoparticles synthesized by hydrothermal route, *Optik - Int. J. Light Electron Optics*, 127, 3688-3692, (2016)
30. GOMEZ-GARCIA F., GONZALEZ-AGUILAR J., OLALDE G., ROMERO M., Thermal and hydrodynamic behavior of ceramic volumetric absorbers for central receiver solar power plants : A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57, p.648-658, 2016.
31. GRANGE B., DALET C., FALCOZ Q., FERRIERE A., FLAMANT G., Impact of thermal energy storage integration on the performance of a hybrid solar gas-turbine power plant, *Appl. Thermal Eng.* 105, 266-275 (2016).
32. GUEVELOU S., ROUSSEAU B., DOMINGUES G., VICENTE J., CALIOT C. Representative elementary volumes required to characterize the normal spectral emittance of silicon carbide foams used as volumetric solar absorbers, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2016, 93, 118-129.
33. GUTTIEREZ A., MIRO L., GIL A., RODRIGUEZ-ASEGUINOMAZA J., BARRENECHE C., CALVET N., PY X, FERNANDEZ A. I., GRAGEDA M., USHAK S., CABEZA L.F., Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59, 763-783, 2016.
34. HAMDAN, A., KABBARA, H., COURTY, M.-A., CHA, M.S., MARTINEZ, J.-M., BELMONTE, T., Synthesis of Carbon–Metal Multi-Strand Nanocomposites by Discharges in Heptane Between Two Metallic Electrodes, *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016, 37 (4) :1069–1090.
35. HAMRIT S., DJESSAS K., BRIHI N., VIALLET B., MEDJOUN K., GRILLO S.E., The effect of thickness on the physico-chemical properties of nanostructured ZnO:Al TCO thin films deposited on flexible PEN substrates by RF-magnetron sputtering from a nanopowder target, *Ceram. Int.* 42, 16212-16219, (2016)
36. HOFFMANN J.F., FASQUELLE T., GOETZ V., PY X., A thermocline thermal energy storage system with filler materials for concentrated solar power plants: Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales. *Appl. Thermal Eng.* 100, 753-761, 2016.
37. HOFFMANN J.F., HENRY J.F., VAITILINGOM G., OLIVES R., CHIRTOC M., CARON D., PY X., Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3omega hot wire method. *Int. J. Thermal Sci.* 107, 105-110, 2016.
38. KACEM M., BRU-ADAN V., GOETZ V., STEYER J.P., PLANTARD G., SACCO D. and WERY N., Inactivation of Escherichia coli by TiO2-mediated photocatalysis evaluated by a culture method and viability-qPCR, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 317, 81-87, 2016.
39. KASPER J.C., ABIAD R., AUSTIN G., BALAT-PICHELIN M., BALE S.D. et al., Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) investigation: Design of the Solar Wind and Coronal Plasma instrument suite for Solar Probe Plus, *Space Sci. Rev.* 204, 2016, 131-186.
40. LAHLALI S., ESSALEH L., BELAQZIZ M., CHEHOUANI H., DJESSAS K., VIALLET B., Analysis of electrical conduction mechanism in the high temperature range of the nanostructured photoabsorber Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub>, *Physica B: Cond. Matter*, 500, 161-164, (2016)
41. LALAU Y., PY X., MEFFRE A. and OLIVES R., Comparative LCA between current and alternative waste-based TES for CSP. *Waste Biomass Valo.*, 7, 1509-1513, 2016.
42. LARROUTOUROU F., CALIOT C., FLAMANT G., Influence of receiver surface spectral selectivity on the solar-to-electric efficiency of a solar tower power plant. *Solar Energy*, 2016, 130, pp 60-73.
43. LI R., ZENG K., SORIA J., MAZZA G., GAUTHIER D., RODRIGUEZ R., FLAMANT G. Product distribution from solar pyrolysis of agricultural and forestry residues. *Renew. Energy* (2016), 89, 27-35
44. MASSINES F., SILVA J., LELIÈVRE J-F, BAZINETTE R., VALLADE J., LECOUVREUR P. AND POULIQUEN S., Hydrogenated Silicon Nitride SiN<sub>x</sub>:H Deposited by Dielectric Barrier Discharge for Photovoltaics, *Plasma Process. Polymers*, 13 (1) 170–183, 2016
45. MAZZA G., SORIA J., GAUTHIER D., REYES URRUTIA A., ZAMBON M., FLAMANT G. Environmental friendly fluidized bed combustion of solid fuels: a review about local scale modelling of heterogeneous combustion. *Waste Biomass Valo.* (2016) 7/2, 237-266
46. MEFFRE A., TESSIER-DOYEN N., PY X., HUGER M., CALVET N., Thermomechanical characterization of waste based TESM and assessment of their resistance to thermal cycling up to 1000 °C, *Waste Biomass Valo.* 7, 9-21, 2016.
47. MENDIL R., BEN AYADI Z., DJESSAS K., Effect of solvent medium on the structural, morphological and optical properties of ZnS nanoparticles synthesized by solvothermal route, *J. Alloys Compds*, 678, 87-92, (2016)
48. MEY-CLOUTIER S., CALIOT C., FLAMANT G., Experimental study of ceramic foams used as high temperature volumetric absorber. *Solar Energy*, 2016, 136, pp 226-235.
49. MICHEL B., MAZET N., NEVEU P. Experimental investigation of an open thermochemical storage process for thermal of solar energy operating with a hydrate salt: local reactive bed evolution, *Appl. Energy* 180 (2016) 234–244
50. MIGUET M., GOETZ V., PLANTARD G. and JAEGGER Y., Sustainable thermal regeneration of spent activated carbons by solar energy: Application to water treatment. *Indus. Eng. Chem. Res.* 55 (25), 7003-7011, 2016.
51. N'TSOUKPOE, K, MAZET N., NEVEU P., The concept of cascade thermochemical storage based on multimaterial system for household applications, *Energy Buildings*, 129, 138-149, 2016
52. NAIR M.M., ABANADES S., Insights into the Redox Performance of Non-stoichiometric Lanthanum Manganite Perovskites for Solar Thermochemical CO<sub>2</sub> Splitting, *Chem. Select* 1 (15), 2016, 4449–4457
53. NAIR M.M., ABANADES S., Tailoring hybrid non-stoichiometric ceria redox cycle for combined solar methane reforming and thermochemical conversion of H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>, *Energ. Fuel.* 30 (7), 2016, 6050–6058.
54. NOU J., CHAUVIN R., THIL S., GRIEU S., A new approach to the real-time assessment of the clear-sky DNI. *Appl. Math. Model.*, 40 (15-16), 7245-7264, 2016.

55. N'TSOUKPOE K., AZOUMAH Y.K., RAMDE E. W., FIAGBE Y.A., NEVEU P., PY X., GAYE M., JOURDAN A., Integrated design and construction of a micro central tower power plant. *Energy Sustain. Dev.* 31, 1-13, 2016.
56. N'TSOUKPOE K., MAZET N., NEVEU P., The concept of cascade thermochemical storage based on multimaterial system for household applications. *Energy Buildings.* 129, 2016, Pages 138-149
57. PEREZ LOPEZ I, BENOIT H, GAUTHIER D, SANS J-L, GUILLOT E, MAZZA G, FLAMANT G. « On-sun operation of a 150 kWth pilot solar receiver using dense particle suspension as heat transfer fluid” *Solar Energy* 137, pp. 463-476, 2016
58. PREVEREAUD Y., VERANT J.L., BALAT-PICHELIN M., MOSCHETTA J.M., Numerical and experimental study of the thermal degradation process during the atmospheric re-entry of a TiAl6V4 tank, *Acta Astron.* 122, 2016, 258-286.
59. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., Production of metallic nanopowders (Mg, Al) by solar carbothermal reduction of their oxides at low pressure, *J. Magn. Alloys* 4(2), 2016, 140-150.
60. RAMOS M., BOIX M., AUSSEL D., MONTASTRUC L., DOMENECH S., Optimal Design of Water Exchanges in Eco-Industrial Parks Through a Game Theory Approach, *Comput. Aided Chem. Eng.* 38 (2016) 1177-1183.
61. RAMOS M., BOIX M., AUSSEL D., MONTASTRUC L., DOMENECH S., Water integration in Eco-Industrial Parks Using a Multi-Leader-Follower Approach, *Comput. Chem. Eng.* 87 (2016) 190-207.
62. REYES URRUTIA A., BENOIT H., ZAMBON M., GAUTHIER D., FLAMANT G., MAZZA G. Simulation of the behavior of a dense SiC particle suspension as an energy transporting vector using computational fluid dynamics (CFD). *Chem. Eng. Res. Design* (2016)106, 141-154.
63. RODRIGUEZ-SANCHEZ M.R., SANTANA D., OLALDE G., Experimental study of honeycomb SiCSi under highly concentrated solar flux: Evolution of its thermo-radiative properties, *Solar Energy Mater. Solar Cells.*, 155, p 253-263, 2016.
64. ROUSSEAU B., GUEVELOU S., MEKEZE-MONTHE A., VICENTE J., DEL CAMPO L., DE SOUSA MENESES D., ECHEGUT P., CALIOT C., FLAMANT G., Tuning the spectral emittance of  $\alpha$ -SiC open-cell foams up to 1300 K with their macro porosity. *AIP Advances*, 2016, 6(6), 065226.
65. SAGNA A., DJESSAS K., SENE C., MEDJNOUN K., GRILLO S. E., Close spaced vapor transport deposition of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films: Effect of iodine pressure, *J. Alloys Compds*, 685, 699-704, (2016)
66. SEMMARI H., STITOU D., MAURAN S., Implementation and experimental results of the new thermo-hydraulic CAPILI pilot, *Int. J. Elect. Energy*, 4, 1, 2016, 32-36.
67. VESEL A., MOZETIC M., BALAT-PICHELIN M., Reduction of a thin chromium oxide film on Inconel surface upon treatment with hydrogen plasma, *Appl. Surf. Sci.* 387, 2016, 1140-1146.
68. ZENG K, SORIA J., GAUTHIER D, MAZZA G, FLAMANT G. Modelling of beech wood pellet pyrolysis under concentrated solar radiation. *Renew. Energy* (2016) 99, 721-729
69. ZHANG H.L., BENOIT H., GAUTHIER D., DEGREVE J., BAEYENS J., PEREZ LOPEZ I., HEMATI M., FLAMANT G. Particle circulation loops in solar energy capture and storage: gas-solid flow and heat transfer considerations. *Appl. Energy* (2016), 161, 206-224.
70. ZHANG Z., ANDRE L., ABANADES S., Experimental assessment of oxygen exchange capacity and thermochemical redox cycle behavior of Ba and Sr series perovskites for solar energy storage, *Solar Energy* 134, 2016, 494-502.

## 2017

71. ANDRÉ L., ABANADES S., CASSAYRE L., High-temperature thermochemical energy storage based on redox reactions using Co-Fe and Mn-Fe mixed metal oxides, *J. Solid State Chem.* 253, 2017, 6-14.
72. ANDRÉ L., ABANADES S., Evaluation and performances comparison of calcium, strontium and barium carbonates during calcination/carbonation reactions for solar thermochemical energy storage, *J. Energy Storage*, 13 (2017) 193-205.
73. ANDRÉ L., ABANADES S., Investigation of metal oxides, mixed oxides, perovskites and alkaline earth carbonates/hydroxides as suitable candidate materials for high-temperature thermochemical energy storage using reversible solid-gas reactions, *Mater. Today Energy*, 10, 2018, 48-61.
74. AULERY F., DUPUY D., TOUTANT A., BATAILLE F., ZHOU Y., Spectral analysis of turbulence in anisothermal channel flows, *Comput. Fluids*, 151, 115-131, 2017.
75. AUSSEL D., BENDOTTI P., PISTEK M., Nash Equilibrium in Pay-as-bid Electricity Market : Part 1 - Existence and Characterisation, *Optimization*, 66:6 (2017), 1013-1025
76. AUSSEL D., BENDOTTI P., PISTEK M., Nash Equilibrium in Pay-as-bid Electricity Market : Part 2 - Best Response of Producer, *Optimization*, 66:6 (2017), 1027-1053.
77. AUSSEL D., SAGRATELLA S., Sufficient conditions to compute any solution of a quasivariational inequality via a variational inequality, *Math. Methods Oper. Res.*, 85 (2017), 3-18.
78. AUSSEL D., SULTANA A., Quasi-Variational Inequality Problems with Non-Compact Valued Constraint Maps, *J. Math. Anal. Appl.*, 456 (2017), 1482-1494
79. BALAT-PICHELIN M., SANS J.L., BECHE E., FLAUD V., ANNALORO J., Oxidation and emissivity of Inconel 718 alloy as potential space debris during its atmospheric entry, *Mat. Charact.* 127, 2017, 379-390.
80. BALAT-PICHELIN M., SANS J.L., ESCAPE C., COMBES H., Emissivity of Elgiloy and pure niobium at high temperature for the Solar Orbiter mission, *Vacuum* 142, 2017, 87-95.
81. BASTARDIS R., VERNAY F., GARANIN D., KACHKACHI H., Surface effects on ferromagnetic resonance in magnetic nanocubes, *J. Phys: Cond. Matt.* 29, 025801 (2017)
82. BELAQZIZ M., MEDJNOUN K., DJESSAS K., CHEHOUANI H., GRILLO S. E., Structural and optical characterizations of Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> (CTS) nanoparticles synthesized by one-step green hydrothermal route, *Materials Research Bulletin*, accepté le 12 septembre 2017
83. BELLEC M., TOUTANT A., OLALDE G., Large Eddy Simulations of thermal boundary layer developments in a turbulent channel flow under asymmetrical heating, *Comput. Fluids*, 151, 159-176, 2017.
84. BELLOUARD Q., ABANADES S., RODAT S., Biomass gasification in an innovative spouted-bed solar reactor: experimental proof of concept and parametric study, *Energ. Fuel*, 31(10), 2017, 10933-10945.

85. BELLOUARD Q., ABANADES S., RODAT S., DUPASSIEUX N., Solar thermochemical gasification of wood biomass for syngas production in a high-temperature continuously-fed tubular reactor, *Int. J. Hydrogen Energ.* 42 (19), 2017, 13486-13497.
86. BENBELGACEM J., BEN MARAI A., MENDIL R., MEDJNOUN K., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Synthesis of CuInS<sub>2</sub> nanoparticles by solvothermal process using dimethylformamide as a solvent, *J. Alloys Compds.* 692C, 966-971, (2017)
87. BESSADA C., BOUVRY B., FERNANDO-CARRION A.J., ANDUJAR J., VERON E., ORY S., BRASSAMIN P., ECHEGUT P., ESCAPE C., NAHHAS T., PY X., Mediterranean Basin Basalts as Potential Materials For Thermal Energy Storage in Concentrated Solar Plants. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 171, 50-59, 2017.
88. BICHOTTE M., KÄMPFE T., IFF W., CELLE F., REYNAUD S., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., DUBOST L., JOURLIN Y., High efficiency concentrated solar power plant receivers using periodic microstructured absorbing layers. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 160, 328-342, 2017
89. BOISVERT J.-S., SADEGHI N., MARGOT J., MASSINES F., Influence of the Excitation Frequency on the Density of Helium Atoms in a Metastable State in an Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge, *J. Appl. Phys.* 121, 043302 (2017)
90. BOISVERT J.-S., MARGOT J., MASSINES F., Discharge physics and influence of the modulation on helium DBD modes in the medium-frequency range at atmospheric pressure, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 77(3) Article n°: 30801, 2017
91. BORGOGNO R., MAURAN S., STITOU D., MARCK G., Thermal-hydraulic process for cooling, heating and power production with low-grade heat sources in residential sector, *Energy Conv. Manag. J.*, 135, 2017, 148-159.
92. BOUVRY B., CARRION A.J.F., ANDUJAR J., VERON E., ORY S., BRASSAMIN S., ECHEGUT P., ESCAPE C., NAHHAS T., PY X., BESSADA C., Mediterranean basin basalts as potential materials for thermal energy storage in concentrated solar plants. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 171, 50-59, 2017.
93. BRUNET P., RINCON LIEVANA R., MASSINES F., CHAKER M., Deposition of homogeneous carbon-TiO<sub>2</sub> composites by atmospheric pressure DBD, *Plasma Process Polymers*, 14 (7) 2017
94. CASTALDI M., VAN DEVENTER J., LAVOIE J.M., LEGRAD J., NZIHOU A., PONTIKES Y., PY X., VANDECASTELE C., VASUDEVAN P.T., VERSTRAETE W., Progress and prospects in the field of biomass and waste to energy and added-value materials. *Waste Biomass Valo.* 8-6, 1-10, 2017.
95. CHABAUD A., EYNARD J., GRIEU S., A rule-based strategy to the predictive management of a grid-connected residential building in southern France. *Sustain. Cities Soc.*, 30, 18-36, 2017.
96. CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., SANS J.L., SCITI D., SILVESTRONI L., Effect of high temperature oxidation on the optical properties of HfC-based ceramics, *Corr. Sci.* 126, 2017, 255-264.
97. CHARPENTIER L., CALIOT C., Impact of the oxidation on the optical properties of TaC. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2017, 171, 16-23.
98. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S., Generating high dynamic range images using a sky imager. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 219-224, 2017.
99. CHONGZHE Z., YANPING Z., FALCOZ Q., NEVEU P., CHENG Z., WEICHENG S., SUHONG H., Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system, *Renew. Energy*, 103, 478-489 (2017)
100. CHONGZHE Z., YANPING Z., HUAY F., FALCOZ Q., NEVEU Q., WEI G., CHENG Z., Effects of geometric parameters on thermal performance for a cylindrical solar receiver using a 3D numerical model, *Energy Conv. Manag.*, 149, 293-302 (2017)
101. COQUAND M., HENAUULT F., CALIOT C. Backward-gazing method for measuring solar concentrator shape errors. *Appl. Optics*, 2017, 56(7), 2029-2037.
102. COURTY M.-A. and MARTINEZ J.-M., Terrestrial carbonaceous debris tracing atmospheric hypervelocity-shock aeroplasma processes. *Procedia Eng.*, 2017 (103): 81-88.
103. COURTY M.-A., Fuel origin and firing product preservation in archaeological occupation contexts, *Quater. Int.*, 2017 (431) 116-130.
104. DEJARDIN J.-L., VERNAY F., RESPAUD M., KACHKACHI H., Effect of dipolar interactions and DC magnetic field on the specific absorption rate of an array of magnetic nanoparticles, *J. Appl. Phys.* 121, 203903 (2017)
105. DUPUY D., TOUTANT A., BATAILLE F., Equations of energy exchanges in variable density turbulent flows, *Phys. Lett. A*, 382(5), 327-333, 2017.
106. ESPAGILLIERE H., DEL CAMPO L., ECHEGUT P., PY X., MUSELLI M., ROCHIER D., Applicability of CSP solar fields to the dry cooling of related thermodynamic cycles. *Appl. Thermal Eng.* 127, 319-329, 2017.
107. FASQUELLE T., FALCOZ Q., NEVEU P., WALKER J., FLAMANT G., Compatibility Study Between Synthetic Oil and Vitrified Wastes for Direct Thermal Energy Storage. *Waste Biomass Valo.*, 8(3), 621-631, 2017.
108. FASQUELLE T., FALCOZ Q., NEVEU P., LECAT F., FLAMANT G., A thermal model to predict the dynamic performances of parabolic trough lines, *Energy*, 141, 1187-1203 (2017)
109. GOMEZ-GARCIA F., GAUTHIER D., FLAMANT G., "Design and performance of a multistage fluidized bed heat exchanger for particle-receiver solar power plants with storage", *Appl. Energy* (2017) 190, 510-523
110. HADDAD N., BEN AYADI Z., MAHDHI H., DJESSAS K., Influence of fluorine doping on the microstructure, optical and electrical properties of SnO<sub>2</sub> nanoparticles, *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 28, 15457-15465, (2017)
111. HAILLOT D., PINCEMIN S., GOETZ V., ROUSSE D., PY X., Synthesis and characterization of multifunctional energy composite: solar absorber and latent heat storage material of high thermal conductivity. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 161, 270-277, 2017.
112. HAN S., CHEN Y., ABANADES S., ZHANG Z., Improving photoreduction of CO<sub>2</sub> with water to CH<sub>4</sub> in a novel concentrated solar reactor, *J. Energy Chem.* 26(4), 2017, 743-749.
113. HOFFMANN J.F., FASQUELLE T., GOETZ V., PY X., Experimental and Numerical Investigation of a Thermocline Thermal Energy Storage Tank. *Appl. Thermal Energy*, 114, 896-904, 2017.
114. JYOTHI J., BISWAS A., SARKAR P., SOUM-GLAUDE A., NAGARAJA H.S., BARSHILIA H.C., Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coating by phase-modulated spectroscopic ellipsometry. *Appl. Physics A*, 123, 496, 2017
115. KACEM M., PLANTARD G., BRIENZA M., GOETZ V., A continuous-flow aqueous system for heterogeneous photocatalytic disinfection of gram-negative *Escherichia coli*, *Indus. Eng. Chem. Res.*, 56 (51), 2017.
116. KENDA E.S., N'TSOUKPOE K.E., OUEDRAOGO I.W.K., PY X., COULIBALY Y., AZOUMAH Y., OUDRAOGO W. F. M., *Jatropha curcas* crude oil as heat transfer fluid or thermal energy storage material for concentrating solar power plants. *Energy Sustain. Dev.* 40, 59-67, 2017.

117. KONG W., TAN T., BAEYENS J., FLAMANT G., ZHANG H., "Bubbling and Slugging of Geldart A Powders in small diameter columns", *Indus. Eng. Chem. Res.*, 2017, 56(14), 4136-4144.
118. KONSTANTINOS D., BAKOGLIDIS D., GLENAT H., GRECZYNSKI G., SCHMIDT S., GRILLO S., HULTMAN L., BROITMAN E., Comparative study of macro- and microtribological properties of carbon nitride thin films deposited by HiPIMS, *Wear*, 370–371, 1-82 (2017)
119. LABIDI M., EYNARD J., FAUGEROUX O., GRIEU S., A new strategy based on power demand forecasting to the management of multi-energy district boilers equipped with hot water tanks. *Appl. Thermal Engineering*, 113, 1366-1380, 2017.
120. LAHLALI S., ESSALEH L., BELAQZIZ M., CHEHOUANI H., ALIMOUSSA A., CAYEZ S., DJESSAS K., VIALLET B., GAUFFIER J.L., Dielectric and modulus analysis of the photoabsorber Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub>, *Physica B: Cond. Matt.*, 526, 54-58, (2017)
121. LALAU Y., FAUGEROUX O., GUILLLOT E., ANDRE D., HUGER M., PROUST A., CHOTARD T., CLAUDET B., IMPACT: A novel device for in-situ thermo-mechanical investigation of materials under concentrated sunlight, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 172, 59-65, 2017.
122. LIA J., WUA Z., ZENG K., FLAMANT G., DINGA A., WANGA J., "Safety and efficiency assessment of a solar-aided coal-fired power plant", *Energy Conv. Manag.* (2017), 150, 714 -724.
123. MAHDHI H., ALAYA S., GAUFFIER J.L., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Influence of thickness on the structural, optical and electrical properties of Ga-doped ZnO thin films deposited by sputtering magnetron, *J. Alloys Compds*, 695, 697-703, (2017)
124. MAHDHI H., GAUFFIER J.L., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Structural, optical and electrical properties of transparent conductive ZnO:Ca films prepared by rf magnetron sputtering from aerogel nanopowders, *Optik – Int. J. Light Electron Optics*, 137, 156-166, (2017)
125. MAHDHI H., GAUFFIER J.L., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Thickness dependence of properties Ga-doped ZnO thin films deposited by magnetron sputtering, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28, 5021–5028, (2017)
126. NADAL E., BARROS N., GLENAT H., LAVERDANT J., SCHMOOL D.S., KACHKACHI H., Plasmon-enhanced diffraction in nanoparticle gratings fabricated by in situ photo-reduction of gold chloride doped polymer thin films by laser interference patterning, *J. Mater. Chem. C* 5 (14), 3553-3560 (2017)
127. NOU J., CHAUVIN R., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., Towards the short-term forecasting of direct normal irradiance using a sky imager. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 14137-14142, 2017.
128. NOUIRI M., BEN AYADI Z., DJESSAS K., EL MIR L., Study of TiO<sub>2</sub>/ITO/ZnO:Al/p-Si photo-sensitive structure based on nanoparticles, *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 28, 14010–14018, (2017)
129. PELAY U., LUO L., FAN Y., STITOU D., ROOD M., "Technical data for concentrated solar power plants in operation, under construction and in project", *Data In Brief Journal*, Aug 2017, 13, pp 597–599, DOI: 10.1016/j.dib.2017.06.030 (2017)
130. PELAY U., LUO L., FAN Y., STITOU D., ROOD M., Technical data for concentrated solar power plants in operation, under construction and in project, *Data In Brief J.*, 2017, 13, 597–599.
131. PLANTARD G. ROSSET A. DJESSAS K. GOETZ V., Correlation between gap energy and photocatalytic efficiencies of nanocatalyst under solar irradiation conditions, *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 28 (12), 8739-8748, 2017.
132. PRIMC G., BALAT-PICHELIN M., MOZETIC M., VESEL A., Oxygen atom density within the interface between glowing oxygen plasma and equilibrium gas, *Vacuum* 143, 2017, 158-164.
133. RIOU O., DELALEUX F., GUIHENEUF V., ESPARGILLIERE H., LOGERAIS O., OLIVES R., PY X., DURASTANTI F., Non-destructive testing method to quantify aging of materials by its apparent emissivity: Case of glass-based reflectors, *Appl. Thermal Eng.*, 115, 539-548, 2017.
134. ROSSET A, PLANTARD G, DJESSAS K, GOETZ V., Correlation between gap energy and photocatalytic efficiencies of nanocatalyst under solar irradiation conditions, *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 28, 8739–8748, (2017)
135. SANCHEZ M., TOUTANT A., BATAILLE F., Numerical Simulations and Analysis of a Low Consumption Hybrid Air Extractor, *ASME. J. Fluids Eng.*, vol. 139 (12), 2017.
136. SANCHEZ-GONZALES A., CALIOT C., FERRIERE A., SANTANA D., Determination of heliostat canting errors via deterministic optimization. *Solar Energy*, 2017, 150, 136-146.
137. SEMMARI H., MAURAN S., STITOU D., Experimental validation of an analytical model of hydraulic motor operating under variable electrical loads and pressure heads, *Appl. Energy J.*, 2017, 206, 1309-1320
138. SORIA J., ZENG K., ASENSIO D., GAUTHIER D, FLAMANT G., MAZZA G., Comprehensive CFD modelling of solar fast pyrolysis of beech wood pellets, *Fuel Proc. Technol.* (2017), 158, 226-237.
139. SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., BICHOTTE M., ESCAPE C., DUBOST L., Optical characterization of TiAlN<sub>x</sub>/TiAlNy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tandem solar selective absorber coatings. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 170, 254-262, 2017
140. STUTZ B., LE PIERRES N., KUZNIK F., JOHANNES K., PALOMO DEL BARRIO E., BEDECARRATS J.-P., GIBOUT S., MARTY P., ZALEWSKI L., SOTO J., MAZET N., OLIVES R., BEZIAN J.-J., PHAM MINH D., Storage of thermal solar energy. *C. R. Phys.*, 18, 401–414, 2017.
141. TELEGANG CHECKEM C., RICHARDSON Y., PLANTARD G., BLIN J., GOETZ V., From biomass residues titania coated carbonaceous photocatalysts: a comparative analysis of different preparation routes for water treatment application. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 2721-2733, 2017
142. TELEGANG CHEKEM C., RICHARDSON Y., DROBEK M., PLANTARD G., BLIN J., GOETZ V., Effective coupling of phenol adsorption and photodegradation at the surface of micro- and mesoporous TiO<sub>2</sub>-activated carbon materials. *Reac. Kin. Mech. Catal.*, 122, 1297-1321, 2017
143. TOUTANT A., General and exact pressure evolution equation, *Phys. Letters A*, 381(44), 3739-3742, 2017.
144. VILLAFÁN-VIDALES H.I., ABANADES S., MONTIEL-GONZÁLEZ M., ROMERO PAREDES-RUBIO H., Carbo- and methano-thermal reduction of tungsten trioxide into metallic tungsten for thermochemical production of solar fuels, *Energy Technol.* 5 (5), 2017, 692–702.
145. VOSSIER A., RIVEROLA A., CHEMISANA A., DOLLET A., GUEYMARD C.A., Is conversion efficiency still relevant to qualify advanced Multi-junction solar cells, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 25, 242-254, 2017
146. WEI M., FAN Y., LUO L., FLAMANT G., "Design and optimization of baffled fluid distribution for realizing target flow distribution in a tubular solar receiver", *Energy* (2017), 136, 126-134.
147. XUA H., SZEJ J. Y., PY X., ROMAGNOLI A., Application of material assessment methodology in latent heat thermal energy storage for waste heat recovery. *Appl. Energy* 187, 281-290, 2017.

148. ZAHER A., NOU J., TRAORE A., THIL S., GRIEU S., Comparative study of algorithms for cloud motion estimation using sky-imaging data. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 5934-5939, 2017.
149. ZAHER A., TRAORE A. AND THIERY F., Satellite image-based method for optimal orientation of solar panels, *IEEE Trans. Sustain. Energy.*, 2017
150. ZEITOUNY J., KATZ E.A., DOLLET A., VOSSIER A., Bandgap Engineering of multi-junction solar cells: effects of series resistance and solar concentration, *Sci. Rep.*, 7, 1766, 2017
151. ZENG K., GAUTHIER D., SORIA J., MAZZA G., FLAMANT G., Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: a review, *Solar Energy*, (2017) 156, 73-92
152. ZENG K., GAUTHIER D., LI R., FLAMANT G., Combined effects of initial water content and heating parameters on solar pyrolysis of beech wood, *Energy* (2017), 125, 552-56.
153. ZENG K., GAUTHIER D., MINH D.P., WEISS-HORTALA E., NZIHOU A., FLAMANT G., Characterization of solar fuels obtained from beech wood solar pyrolysis, *Fuel* (2017) 188, 285-293.
154. ZHANG H., KONG W., TAN T., FLAMANT G., BAEYENS J., Experimental support an improved model for particle transport in fluidized bed, *Sci. Rep.* (2017), 7:10178.
155. ZHANG H.L., BENOIT H., PEREZ-LOPEZ I., FLAMANT G., TAN T., BAEYENS J. High-efficiency solar power towers using particle suspensions as heat carrier in the receiver and in the thermal energy storage. *Renew. Energy* (2017), 111, 438-446

## 2018

156. ABANADES S., ANDRÉ L., Design and demonstration of a high temperature solar-heated rotary tube reactor for continuous particles calcination, *Appl. Energy*, 212, 2018, 1310-1320.
157. ABOUNACHIT O., BELAQZIZ M., CHEHOUANI H., VIALLET B., MEDJNOUN K., Djessas K., Modeling and experimental investigation of the close-spaced vapor transport process for the growth of  $\text{CuIn}(\text{S}_{0.4}\text{Se}_{0.6})_2$  thin films, *Thin Solid Films*, 660, 499-505, (2018)
158. AGAGNA B., A SMAILI, Q FALCOZ, O BEHAR, Experimental and numerical study of parabolic trough solar collector of MicroSol-R tests platform, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 98, 251-266 (2018)
159. ANDRÉ L., ABANADES S., CASSAYRE L., Experimental investigation of Co-Cu, Mn-Co and Mn-Cu redox materials applied to solar thermochemical energy storage, *ACS Appl. Energy Mater.*, 1(7), 2018, 3385-3395.
160. ANDRÉ L., ABANADES S., CASSAYRE L., Mixed metal oxide systems applied to thermochemical storage of solar energy: benefits of secondary metal addition in Co and Mn oxides and contribution of thermodynamics, *Appl. Sci.*, 8(12), 2018, 2618.
161. ANDRÉ L., ABANADES S., Investigation of metal oxides, mixed oxides, perovskites and alkaline earth carbonates/hydroxides as suitable candidate materials for high-temperature thermochemical energy storage using reversible solid-gas reactions, *Mater. Today Energy*, 10, 2018, 48-61.
162. AUSSEL D., DUTTA J., XU A. C., Error Bounds for Strongly Monotone Variational Inequalities using the Dual Gap Function, *J. Convex Analysis*, 25 (2018), 1121-1138
163. AVILA-MARIN A. L., CALIOT C., FLAMANT G., ALVAREZ DE LARA M., FERNANDEZ-RECHE J., Numerical determination of the heat transfer coefficient for volumetric air receivers with wire meshes, *Solar Energy* (2018), 162, 317-329.
164. BACHAR A, BOUSQUET A, MEHDI H, MONIER G, ROBERT-GOUMET C, THOMAS L, BELMAHI M, GOULLET A, SAUVAGE T, TOMASELLA E, Composition and optical properties tunability of hydrogenated silicon carbonitride deposited by reactive magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.*, 444 (2018), 293-302
165. BALAT-PICHELIN M., BOUSQUET A., Total hemispherical emissivity of sintered SiC up to 1850 K in high vacuum and in air at different pressures, *J. Eur. Ceram. Soc.* 38, 2018, 3447-3456.
166. BASTARDIS R., VERNAY F., KACHKACHI H., « Magnetization nutation induced by surface effects in nanomagnets » *Phys. Rev. B* 98, 165444 (2018)
167. BELAQZIZ M., MEDJNOUN K., DJESSAS K., CHEHOUANI H., GRILLO S. E., Structural and optical characterizations of  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  (CTS) nanoparticles synthesized by one-step green hydrothermal route, *Mater. Res. Bull.*, 99, 182-188, (2018)
168. BEN BELGACEM J., NOUIRI M., MEDJNOUN K., DJESSAS K., BEN AYADICZ.,  $\text{CuInS}_2$  thin films obtained through an innovative CSVT deposition method from solvothermal-generated precursors, *Mater. Sci. Semicond. Proc.*, 83, 224-230, (2018)
169. BENOIT H., ANSART R., NEAU H., GARCIA TRINANES P., FLAMANT G., SIMONIN O., 3D numerical simulation of upflow bubbling fluidized bed in opaque tube under high flux solar heating. *AIChE J.*, 64(11), 3857- 3867 (2018).
170. BOISVERT J.S., STAFFORD L., NAUDE N., MARGOT J., MASSINES F. Electron Density and Temperature in an Atmospheric-Pressure Helium Diffuse Dielectric Barrier Discharge from kHz to MHz, 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* 27 035005
171. BRUNET P., RINCON R., MATOUK Z., CHAKER M., MASSINES F., Tailored waveform of Dielectric Barrier Discharge to monitor composite thin film morphology, *Langmuir*, 2018, 34 (5), 1865-1872
172. CHAIX L., HUANG E. W., GERBER S., LU X., JIA C., HUANG Y., MCNALLY D. E., WANG Y., VERNAY F. H., KEREN A., SHI M., MORITZ B., SHEN Z.-X., SCHMITT T., DEVEREAUX T. P., LEE W.-S., « Resonant inelastic x-ray scattering studies of magnons and bimagnons in the lightly doped cuprate  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  » *Phys. Rev. B* 97, 155144 (2018)
173. CHAUVIN R., NOU J., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., A new approach to the real-time assessment and intrahour forecasting of clear-sky direct normal irradiance. *Solar Energy*, 167, pp. 35-51, 2018.
174. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Comprehensive performance assessment of a continuous solar-driven biomass gasifier, *Fuel Proc. Technol.*, 182, 2018, 1-14.
175. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Experimental analysis of continuous steam gasification of wood biomass for syngas production in a high-temperature particle-fed solar reactor, *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*, 2018, 125, 253-265.
176. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Solar chemical looping gasification of biomass with the  $\text{ZnO}/\text{Zn}$  redox system for syngas and zinc production in a continuously-fed solar reactor, *Fuel*, 215, 2018, 66-79.

177. CURE J., ASSI H., COCQ K., MARIN L., FAU P., BECHE E., CHABAL Y., ESTEVE A., ROSSI C., Controlled Self-Intercalation and Grafting of High-Density Au Nanoparticles on Zinc Oxide Thin Films by Photo-Deposition, *Langmuir*, 34 (5) (2018) 1932–1940.
178. DAUCHET J., BEZIAN J.-J., BLANCO S., CALIOT C., CHARON J., COUSTET C., EL HAFI M., EYMET V., FARGES O., FOREST V., FOURNIER R., GALTIER M., GAUTRAIS J., KHUONG A., PELISSIER L., PIAUD B., ROGER M., TERRÉE G., WEITZ S., Addressing nonlinearities in Monte Carlo, *Sci. Rep.* (2018), 8(1), 13302.
179. DÉJARDIN J.-L., FRANCO A., VERNAY F., KACHKACHI H., Ferromagnetic resonance of a two-dimensional array of nanomagnets: Effects of surface anisotropy and dipolar interactions, *Phys. Rev. B* 97, 224407 (2018)
180. DÉJARDIN P.-M., CORNATON Y., GHESQUIÈRE P., CALIOT C., BROUZET R., Calculation of the orientational linear and nonlinear correlation factors of polar liquids from the rotational Dean-Kawasaki equation, *The J. Chem. Phys.* (2018), 148, 044504.
181. DIAGO M., CRESPO INIESTA A., SOUM-GLAUDE A., CALVET N., Characterization of desert sand to be used as a high temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology, *Appl. Energy* 216 (2018) 402-413
182. DUPUY D., TOUTANT A., BATAILLE F., Turbulence kinetic energy exchanges in flows with highly variable fluid properties, *J. Fluid Mech.*, 834, 5-54, 2018.
183. ELATMANI K., OUJJI N.B., PLANTARD G., GOETZ V., AITICHOU I., 3D photocatalytic media for decontamination of water from pesticides, *Mater. Res. Bull.*, 101, 6-11, 2018.
184. FASQUELLE T., FALCOZ Q., NEVEU P., HOFFMANN J.F., A temperature threshold evaluation for thermochemical energy storage in concentrated solar power plants, *Appl. Energy*, 212, 1153-1164, 2018.
185. FASQUELLE T., FALCOZ Q., NEVEU P., HOFFMANN J.F., Numerical simulation of a 50MWe parabolic trough power plant integrating a thermochemical storage tank, *Energy Conv. Manag.*, 172, 9-20, 2018.
186. FERRUCCI F., STITOU D., ORTEGA P., LUCAS F., Mechanical compressor-driven thermochemical storage for cooling applications in tropical insular regions. Concept and efficiency analysis, *Appl. Energy J.*, 219, 240-255, (2018)
187. FITO J., CORONAS A., MAURAN S., MAZET N., STITOU D. Definition and performance simulations of a novel solar-driven hybrid absorption-thermochemical refrigeration system. *Energy Conv. Manag.*, 175, 1 2018, 298-312, (2018)
188. GROSJEAN A., SOUM-GLAUDE A., NEVEU P., THOMAS L., Comprehensive simulation and optimization of porous SiO<sub>2</sub> antireflective coating to improve glass solar transmittance for solar energy applications, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 182 (2018) 166-77
189. HAEUSSLER A., ABANADES S., JOUANNAUX J., JULBE A., Non-stoichiometric redox active perovskite materials for solar thermochemical fuel production: a review, *Catalysts*, 8(12), 2018, 611.
190. HENAULT F., COQUAND M., DEFIEUX P.-H., CALIOT C., Sun backward gazing method with multiple cameras for characterizing solar concentrators, *Solar Energy* (2018), 166, 103-114.
191. HOFFMANN J.F., VAILINGOM G., HENRY J.F., CHIRTOC M.; OLIVES R.; GOETZ V.; PY X., Temperature dependence of thermophysical and rheological properties of seven vegetable oils in view of their use as heat transfer fluids in concentrated solar plants, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 178, 129-138, 2018.
192. KENDA E.S., PY X., N'TSOUKPOE K.E., COULIBALY Y., SADIKI N., Thermal energy storage materials made of natural and recycled resources for CSP in West Africa. *Waste Biomass Valo.*, 9, 1687-1701, 2018
193. LI D., CHEN Y., ABANADES S., ZHANG Z., Enhanced activity of TiO<sub>2</sub> by concentrating solar light for photoreduction of CO<sub>2</sub> with H<sub>2</sub>O to CH<sub>4</sub>, *Catal. Com.*, 113, 2018, 6-9.
194. MAHDHI H., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Synthesis and characteristics of Ca-doped ZnO thin films by rf magnetron sputtering at low temperature, *Mater. Lett.*, 214,10-14, (2018)
195. MENDIL R., Z. BEN AYADI C., VAZQUEZ-VAZQUEZ M. A., LOPEZ-QUINTELA M.A., DJESSAS K., A new procedure to synthesis of ZnS<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> nanoparticles by a facile solvothermal method, 29,10656–10662, (2018)
196. MILOSAN I., FLAMANT G., GUILLLOT E., CRISAN A., BEDO T., VOICULESCU I., GEANTA V., SEMENESCU A., POP M.A., CRISTEA D., STOICANESCU, GABOR C., SARBU F.A., GHUITA I., Comparative Study of Heat Treatment Effects Performed with Solar Energy and Electric Furnace on EN 1.4848 Stainless Steel Alloyed with Co, W, Cu and Mo. *Revista Chimie*, 69(5) 1050-1054 (2018)
197. MOUHOUB A., BOULOUBA A., DJESSAS K., MESSOUS A., Analytical modeling and optimization of original bifacial solar cells based on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films absorbers, Superlattices and Microstructures, 122, 434-443, (2018)
198. NADAL E., BARROS N., GLENAT H., KACHKACHI H., « Optical properties of complex plasmonic materials studied with extended effective medium theories combined with Rigorous Coupled Wave Analysis », *Materials* 11(3), 351 (2018)
199. NAHHAS T., PY X., OLIVES R., Life cycle assessment of air-rock packed bed storage system and its comparison with other available storage technologies for concentrating solar power plants, *Waste Biomass Valo.*, 2018.
200. NAIR M. M., ABANADES S., Experimental screening of perovskite oxides as efficient redox materials for solar thermochemical CO<sub>2</sub> conversion, *Sustain. Energy Fuels*, 2, 2018, 843-854.
201. NOU J., CHAUVIN R., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., Towards the short-term forecasting of direct normal irradiance using sky-imaging data. *Heliyon*, 4 (4), e00598, 2018.
202. NOUIRI M., Djessas K., EL MIR L., Towards an optical switching of memory effect in Au/TiO<sub>2</sub>/ITO/ZnO:Al/p-Si heterostructure based on nanoparticles, *Appl. Nanosci.*, 8, 2001-2007, (2018)
203. OLIVEIRA F.A.C., BARREIROS M.A., ABANADES S., CAETANO A.P.F., NOVAIS R.M., PULLAR R.C., Solar thermochemical CO<sub>2</sub> splitting using cork-templated ceria ecoceramics, *J. CO<sub>2</sub> Utilization*, 26, 2018, 552-563.
204. PLANTARD G., AZAIS A., MENDRET J., BROSILLON S., GOETZ V., Coupling of photocatalytic and separation process as a contribution to mineralization of real wastewater : focusing on 4 molecules, *Chem. Eng. Proc. :Process Intensification*, 134, 115-123, 2018.
205. PLUJAT B, GLENAT H, GAZAL Y, GOULLET A, HERNANDEZ E, QUOIZOLA S, THOMAS L, Near-field scanning microscopy and physico-chemical analysis versus time of SiCN:H thin films grown in Ar/NH<sub>3</sub>/TMS gasmixture using MW-Plasma CVD at 400 °C, *Plasma Proc. Polymers*, 15(10) 2018

206. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., Experimental carbothermal reduction of MgO at low pressure using concentrated solar energy, *J. Mining & Metall. - Section B: Metallurgy* 54(1), 2018, 39-50.
207. ROSSET A., PLANTARD G., DJESSAS K., Photocatalytic efficiencies of Zn<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>O compounds synthesized with a band panel of M elements : Responses in the UV, visible and solar range, *J. Environ. Chem. Eng.*, 6, 7273-7283, 2018.
208. SALAS D., TAPACHES E., MAZET N., AUSSEL D. Economical optimization of thermochemical storage in concentrated solar power plants via pre-scenarios. *Energy Conv. Manag.*, 174, 2018, 932-954.
209. SOLÉ A., FALCOZ Q., CABESSA L., NEVEU P., Geometry optimization of a heat storage system for concentrated solar power plants (CSP), *Renew. Energy*, 123, 227-235, 2018.
210. TOUTANT A., Numerical simulations of unsteady viscous incompressible flows using general pressure equation, *J. Comput. Phys.*, 374, 822-842, 2018.
211. VOSSIER A., ZEITOUNY J., KATZ E.A., DOLLET A., FLAMANT G., GORDON J.M., Performance bounds and perspective for hybrid solar photovoltaic/thermal electricity-generation strategies, *Sustain. Energ. Fuels*, 2, 2060-2067, 2018
212. WU H., GAUTHIER D., YU Y., GAO X., FLAMANT G., Solar-Thermal Pyrolysis of Mallee Wood at High Temperatures, *Energy Fuels* 32 (4), 4350-4356, (2018)
213. XUA H., DAL MAGRO F., SADIKI N., MANCAUX J.M., PY X., ROMAGNIOLI A., Compatibility study between aluminium alloys alternative recycled ceramics for thermal energy storage applications, *Appl. Energy*, 220, 94-105, 2018.
214. ZEITOUNY J, LALAU N., GORDON J.M., KATZ E.A., FLAMANT G., DOLLET A., VOSSIER A., Assessing high-temperature photovoltaic performance for solar hybrid power plants. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 182, 61-67 (2018)

## 2019

215. ABANADES S., Metal oxides applied to thermochemical water-splitting for hydrogen production using concentrated solar energy, *Chem. Eng.*, 2019, 3(3), 63
216. ARENA H., COULIBALY M., SOUM-GLAUDE A., JONCHÈRE A., MESBAH A., ARRACHAT G., PRADEILLES N., MAITRE A., DESCHANELS X., Carbide nanocomposite TiC - SiC for bulk solar absorbers applications: effect of density and surface roughness, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 191 (2019) 199-208
217. AVELLANEDA J.M., TOUTANT A., BATAILLE F., DNS of turbulent low Mach channel flow under asymmetric high temperature gradient: effect of thermal boundary condition on turbulence statistics, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 77, 40-47, 2019
218. AVELLANEDA J.M., TOUTANT A., FLAMANT G., NEVEU P., BATAILLE F., Entropy Generation in Nonisothermal Flows: Influence of Boundary Condition Type and Intensity, *J. Thermophys. Heat Transfer*, (2019).
219. AVILA-MARIN A. L., CALIOT C., ALVAREZ DE LARA M., FERNANDEZ-RECHE J., MONTES M. J., MARTINEZ-TARIFA A., Homogeneous equivalent model coupled with P1-approximation for dense wire meshes volumetric air receivers, *Renew. Energy*, 2019, 135, 908-919.
220. BALAT-PICHELIN M. DE SOUSA MENESES D., ANNALORO J., Behavior and optical properties of Zerodur® at high temperatures, *Infrared Phys. Technol.* 101, 2019, 68-77
221. BARKA L., BALAT-PICHELIN M., SANS J.L., BECHE E., Oxidation and emissivity of Invar 36 alloy in air plasma at high temperatures, *J. Alloys Compds* 772, 2019, 1003-1016.
222. BELLOUARD Q., RODAT S., ABANADES S., RAVEL S., FRAYSSINES P.E., Design, simulation and experimental study of a directly-irradiated solar chemical reactor for hydrogen and syngas production from continuous solar-driven wood biomass gasification, *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 2019, 19193-19205.
223. BEN KHELIFA A., SOUM-GLAUDE A., KHAMLICH S., GLÉNAT H., BALGOUTHY M., GUIZANI A., MAAZA M., DIMASSI W., Optical simulation, characterization and thermal stability of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayer solar selective absorber coatings, *J. Alloys Compds* 783 (2019) 533-544
224. BOUJJAT H., RODAT S., CHUAYBOON S., ABANADES S., Experimental and Numerical Study of a Directly Irradiated Hybrid Solar/Combustion Spouted Bed Reactor for Continuous Steam Gasification of Biomass, *Energy*, 2019, 189, 116118.
225. BOUJJAT H., RODAT S., CHUAYBOON S., ABANADES S., Numerical simulation of reactive gas-particle flow in a solar jet spouted bed reactor for continuous biomass gasification, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2019, 144, 118572.
226. BRIENZA M. NIR S., PLANTARD G., GOETZ V., CHIRON S., Combining micelle-clay sorption to solar photo fenton processes for domestic wastewater treatment, *Environ. Sci. Pollution Research*, 26, 18971-18978, 2019
227. CAO X., JIA S., AVELLANEDA J-M., LUO Y., YUAN X., FLAMANT G., YU K-T., An optimization method to find the thermodynamic limit on enhancement of solar thermal decomposition of methane, *Int. J. Hydrogen Energy*. 44, 16164-16175 (2019).
228. CHARPENTIER L., CHEN D., COLAS J., MERCIER F., PONS M., PIQUE D., GIUSTI G., J.L. SANS, BALAT-PICHELIN M., Multilayer Multifunctional Advanced Coatings for Receivers of Concentrated Solar Power plants, *MRS Communication*, Materials Research Society, 2019.
229. CHEIKH S., ZEBBAR D., KHERRIS S., STITOU D., BENCHATTI A. (2019), Cascading Heat Transformation Process for Power Generation, *Eur. J. Elect. Eng.*, 21(1), 115-123, 2019.
230. CHEN D., COLAS J., MERCIER F., BOICHOT R., CHARPENTIER L., ESCAPE C., BALAT-PICHELIN M., PONS M., High temperature properties of AlN coatings deposited by chemical vapor deposition for solar central receivers, *Surf. Coat. Technol.*, 377, 2019, 124872 (8 p.)
231. CHONGZHE Z., HUAY F., ZANG Y., FALCOZ Q., ZHANG C., GAO C., Geometric optimization model for the solar cavity receiver with helical pipe at different solar radiation. *Front. Energy*. 13(2), 2019, 284-295.
232. CHUAYBOON S., ABANADES S., Clean magnesium production using concentrated solar heat in a high-temperature cavity-type thermochemical reactor, *Journal of Cleaner Production*, 232, 2019, 784-795.
233. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Insights into the influence of biomass feedstock type, particle size and feeding rate on thermochemical performances of a continuous solar gasification reactor, *Renew. Energy*, 130, 2019, 360-370.

234. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Syngas production via solar-driven chemical looping methane reforming from redox cycling of ceria porous foam in a volumetric solar reactor, *Chem. Eng. J.*, 356, 2019, 756-770.
235. DAN A., SOUM-GLAUDE A., CARLING PLAZA A., HO C., CHATTOPADHYAY K., BARSHILIA H.C., BASU B., Temperature- and Angle-Dependent Emissivity and Thermal Shock Resistance of the W/WAIN/WAION/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Based Spectrally Selective Absorber, *ACS Appl. Energy Mater.* 2 (2019) 5557-5567
236. DAVE A.K. COURTY M.-A. , FITZSIMMONS K.E., SINGHVI A.K. Revisiting the contemporaneity of a mighty river and the Harappans: Archaeological, stratigraphic and chronometric constraints. *Quater. Geochronology* 49: 230-235, 2019.
237. DU CLUZEAU A., BOIS G., TOUTANT A., Analysis and modelling of Reynolds stresses in turbulent bubbly up-flows from direct numerical simulations, *J. Fluid Mech.*, in press, 2019.
238. DUPUY D., TOUTANT A., BATAILLE F., Effect of the Reynolds number on turbulence kinetic energy exchanges in flows with highly variable fluid properties, *Phys. Fluids*, 31, 015104, 2019.
239. DUPUY D., TOUTANT A., BATAILLE F., Study of the large-eddy simulation subgrid terms of a low Mach number anisothermal channel flow, *Int. J. Thermal Sci.*, 135, 221-234, 2019.
240. FITO J., CORONAS A., MAURAN S., MAZET N., PERIER-MUZET M., STITOU D. Hybrid system combining mechanical compression and thermochemical storage of ammonia vapor for cold production. *Energy Conv. Manag.*, 180, 709-723, 2019.
241. GODEFROY A., PERIER-MUZET M., MAZET N. Thermodynamic analyses on hybrid sorption cycles for low-grade heat storage and cogeneration of power and refrigeration, *Appl. Energy*, 255, 2019, 113751
242. HAEUSSLER A., ABANADES S., JOUANNAUX J., DROBEK M., AYRAL A., JULBE A., Recent progress on ceria doping and shaping strategies for solar thermochemical water and CO<sub>2</sub> splitting cycles, *AIMS Mater. Sci.*, 6(5), 2019, 657-684.
243. HE X., ZENG K., XIE Y., FLAMANT G., YANG H., YANG X., NZIHOU A., ZHENG A., DING Z., CHEN H., The effects of temperature and molten salt on solar pyrolysis of lignite, *Energy* (2019) 181, 407-416.
244. HOFFMANN J.F., FASQUELLE T., VAITILINGOM G., OLIVES R., PY X., GOETZ V., Compatibility of vegetable oils with solid filler materials for thermocline thermal energy storage systems, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 200, 109932, 2019
245. JOUANNAUX J., HAEUSSLER A., DROBEK M., AYRAL A., ABANADES S., JULBE A., Lanthanum manganite perovskite ceramic powders for CO<sub>2</sub> splitting: Influence of Pechini synthesis parameters on sinterability and reactivity, *Ceram. Int.*, 45(12), 2019, 15636–15648.
246. KANG Q., FLAMANT G., DEWILL R., BAEYENS J., ZHANG H.L., DENG Y.M., Particles in a circulation loop for solar energy capture and storage. *Particuology*, 43, 149-156 (2019)
247. LACROIX C., PERIER-MUZET M., STITOU D., Dynamic modeling and preliminary performance analysis of a new solar thermal reverse osmosis desalination process, *Energies J.*, 2019, 12 (20), 4015, (2019)
248. LALAU Y., FAUGEROUX O., CLAUDET B., GUILLOT E., ANDRE D., HUGER M., PROUST A., CHOTARD T., A method for experimental thermo-mechanical aging of materials submitted to concentrated solar irradiation. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 192, 161-169, 2019.
249. LE BARON E., GIRAUD P., ADIRE M., RACCURT O., BARRIGA J., ECHEGUT P., DE SOUSA MENESES D., CAPIANI C., SCITI D., SOUM-GLAUDE A., ESCAPE C., JERMAN I., LÓPEZ G. A., ECHÁNIZ T., TELLO M. J., MATINO F., MACCARI A., MERCATELLI L., SANI E., Round Robin Test for the Comparison of Spectral Emissivity Measurement Apparatuses, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 191 (2019) 476-485
250. LE GAL A., GRANGE B., TESSONNEAUD M., PEREZ A., ESCAPE C., SANS J-L., FLAMANT G., Thermal analysis of fluidized particle flows in a finned tube solar receiver. *Solar Energy* (2019), 191, 19-33.
251. LELIEVRE J.F., KAFLE B., SAINT-CAST P., BRUNET P., MAGNAN R., HERNANDEZ E., POULIQUEN S. AND MASSINES F., Efficient silicon nitride SiN<sub>x</sub>:H antireflective and passivation layers deposited by atmospheric pressure PECVD for silicon solar cells, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2019, 1-13.
252. LOPEZ-FERBER N., PHAM MINH D., FALCOZ Q., MEFFRE A., TESSIER-DOYEN N., NZIHOU A., GOETZ V., Development of a thermal energy storage pressed plate ceramic based on municipal waste incinerator bottom ash and waste clay, *Waste Biomass Valo.*, acceptée le 18/02/2019, article in press.
253. LOPEZ-FERBER N.; FALCOZ Q.; PHAM MINH D.; HOFFMANN J.F.; MEFFRE A.; NZIHOU A.; GOETZ V., Flexibility and robustness of a high-temperature air/ceramic thermocline heat storage pilot, *J. Energy Storage*, 21, 393-404, 2019.
254. MAGNAN R, HAGELAAR G.J.M., CHAKER M. AND MASSINES F., Atmospheric pressure dual RF-LF frequency discharge: Influence of LF voltage amplitude on the RF discharge behavior. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019, 10.1088/1361-6595/ab4cfe
255. MAHDHI H., BEN AYADI Z., DJESSAS K., Physical properties of metal-doped ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering at room temperature, *J. Solid State Electrochem.*, DOI 10.1007/s10008-019-04312-7 (2019)
256. MILOSAN I., CRISTEA D., VOICULESCU I., POP M.A., BALAT-PICHELIN M., PREDESCU A., BOGATU C.A., BEDO T., BERBECARU A., GEANTA V., GABOR C., ISAC L.A., SARBU F.A., OANCEA G., Characterization of EN 1.4136 stainless steel heat-treated in solar furnace, *The Int. J. Adv. Manufact. Technol.*, 101(9-12), 2019, 2955-2962.
257. MILOSAN I., VARGA B., BEDO T., POP M.A., BALAT-PICHELIN M., LUCA-MOTOC D., STOICANESCU M., Thermal analysis on AlSi<sub>12</sub>-SiC hybrid composites sintered, *J. Thermal Anal. Calorim.*, 138(4), 2019, 2937-2944
258. PELAY U., LUO L., FAN Y., STITOU D., CASTELAIN C., Integration of a Thermochemical Energy Storage System in a Rankine, *Energy J.*, 167, 15, 498- 510, (2019)
259. PIRIOU C., RAPAUD O., FOUCAUD S., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., COLAS M., Sintering and oxidation behavior of HfB<sub>2</sub>-SiC composites from 0 to 30% vol. SiC between 1450 and 1800 K, *Ceram. Int.* 45, 2019, 1846-1856.
260. PLUJAT B., GLENAT H., BOUSQUET A., FREZET L., HAMON J., GOULLET A., TOMASELLA E., HERNANDEZ E., QUOIZOLA S., THOMAS L., "SiCN:H thin films deposited by MW-PECVD with liquid organosilicon precursor: Gas ratio influence versus properties of the deposits", *Plasma Proc. Polymers*, 2019.
261. PRUVOST J., GOETZ V., ARTU A., DA P., ALJABRI H., Thermal modelling of microalgal biomass production in the harsh desert conditions of state of Qatar, *Algal Res.*, 38, 101381-12p , 2019.

262. PULLAR R.C., NOVAIS R.M., CAETANO A.P.F., BARREIROS M.A., ABANADES S., COSTA OLIVEIRA F.A., A review of solar thermochemical CO<sub>2</sub> splitting using ceria-based ceramics with designed morphologies and microstructures, *Front. Chem.*, 2019, 7, 601.
263. REOYO-PRATS R., CARLING PLAZA A., FAUGEROUX O., CLAUDET B., SOUM-GLAUDE A., HILDEBRANDT C., BINYAMIN Y., AGUERO A., MEIßNER T., Accelerated aging of absorber coatings for CSP receivers under real high solar flux – Evolution of their optical properties. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 193, 92-100, 2019.
264. RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M.R., LERAY C., TOUTANT A., FERRIERE A., OLALDE G., Development of a new method to estimate the incident solar flux on central receivers from deteriorated heliostats, *Renew. Energy*, 130, 182-190, 2019.
265. SHAFIEI KALEIBARI S., YANPING Z., ABANADES S., Solar-driven high temperature hydrogen production via integrated spectrally split concentrated photovoltaics (SSCPV) and solar power tower, *Int. J. Hydrogen Energy*, 44(5), 2019, 2519-2532.
266. SORIA J., LI R., FLAMANT G., MAZZA G., Influence of pellet size on product yields and syngas composition during solar driven high temperature fast pyrolysis of biomass, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 140, 299-311 (2019). doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.007
267. TAPACHES E., SALAS D., PERIER-MUZET M., MAURAN S., AUSSEL D., MAZET N. The Value of Thermochemical Storage for CSP: economic and technical conditions of power plants profitability on SPOT markets. *Energy Conv. Manag.*, Volume 198, (2019)
268. TELEANG CHEKEM C. GOETZ V., RICHARDSON Y., PLANTARD G., BLIN J., Modeling of adsorption/photodegradation phenomena on AC-TiO<sub>2</sub> composite catalyst for water detoxification, *Catalysis Today*, 328, 183-188, 2019
269. TOLBA H., DKHILI N., NOU J., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., GHI forecasting using Gaussian process regression: a kernel study, *IFAC PapersOn-Line*, 52 (4), 455-460, 2019.
270. XIAO H., YANPING Z., YOU C., CHONGZHE Z., FALCOZ Q., Effects of critical geometric parameters on the optical performance of a conical cavity receiver. *Front. Energy*, 1-11, 2019
271. XIE Y., ZENG K., FLAMANT G., YANG H., LIU N., HE X., YANG X., NZIHOU A., CHEN H., Solar pyrolysis of cotton stalk in molten salt for bio-fuel production. *Energy* 179, 1124-1132 (2019).
272. ZENG K., LI R., PHAM MINH D., WEISS-HORTALA E., NZIHOU A., HE X., FLAMANT G., Solar pyrolysis of heavy metal contaminated biomass for gas fuel production. *Energy* (2019), 187, 116016.

## Brevets

## Patents

### 2016

273. STITOU D., MAURAN S., MAZET N., FR 14 62192 : « Procédé de purification de l'eau par osmose inverse et installation mettant en œuvre un tel procédé » (DEPOTHS), Demande de brevet déposée par la SATT AxLR au nom du CNRS le 10/12/2014., Brevet FR 3029907 (A1) du 17/06/2016., Brevet PCT EP2015/0709020 du 08/12/2015., Brevet WO 2016091901 (A1) publié le 16/06/2016
274. STITOU D., MAURAN S., MAZET N., FR 15 52396 : « Dispositif solaire de production autonome de froid par sorption solide-gaz » (DACSOL), Demande de brevet déposée par la SATT AxLR au nom du CNRS le 23/03/2015., Brevet FR 3034179 (A1) publié le 30/09/2016., Brevet WO 2016/151017 (A1) publié le 29/09/2016

### 2017

275. SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., QUOIZOLA S., DI GIACOMO L., HERNANDEZ E., FR 17 60859 : « Revêtement et dispositif associé », Patent filed 17 Nov 2017
276. SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., QUOIZOLA S., DI GIACOMO L., HERNANDEZ E., FR 17 61313 : « Réacteur de dépôt de couches et procédé de dépôt associé », Patent filed 17 Nov 2017

### 2018

277. MAZET N., MAURAN S., NEVEU P., STITOU D., LUO L., FAN Y., FR 16 62785 : Installation de production d'électricité comprenant un stockage de chaleur. Demande de brevet déposée le 19/12/2016 par le CNRS aux noms du CNRS et de l'Université de Nantes. Brevet FR3060719 publié le 22/06/2018
278. STITOU D., MAURAN S., MAZET N., FR 16 61451 - Système et procédé de purification de liquide par osmose inverse" (DEMPOTHS). Demande de brevet déposée par la SATT AxLR au nom du CNRS le 24/11/2016. Brevet FR3059000 publié le 25/05/2018

### 2019

279. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S. FR1758549 : « Système de mesure des composantes du rayonnement solaire ». Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 2019.
280. CHIRON S., BRIENZA M., GOETZ V. PLANTARD G. TELEANG CHEKEM C., Procédé de traitement de l'eau par oxydation avancée activée par énergie solaire et réacteur adapté. Brevet FR19005843, 2019.
281. STITOU D., PUBILL A., MAZET N., RIGAUD L., TADIOTTO D., FR 17 70948 - Installation de réfrigération d'un caisson isotherme jusqu'à une température cible et Procédé associé. Demande de brevet déposée le 11/09/2017 aux noms de COLDWAY et du CNRS . Brevet FR 3071046 (A1) publié le 15/03/2019., Brevet WO 2019/048793 du 14/03/2019

## Communications dans des congrès Internationaux avec Actes et CL

### Communications in international conferences

2016

282. ANDRÉ L., S. ABANADES, L. CASSAYRE, Experimental and thermodynamic study of Co-Fe and Mn-Fe based mixed metal oxides for thermochemical energy storage application, SolarPaces 2016: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, 11–14 Oct. 2016, Abu Dhabi (EAU), publié dans: AIP Conference Proceedings 1850, 090002 (2017).
283. AVILA-MARIN A. L., FERNANDEZ-RECHE J., CASANOVA M., CALIOT C., FLAMANT G., Numerical simulation of convective heat transfer for inline and stagger stacked plain-weave wire mesh screens and comparison with a local thermal non-equilibrium model. Proceedings of SolarPaces 2016 Conference, 2016.
284. BACHAR A, BOUSQUET A, ROBERT-GOUMET C, MONIER G, THOMAS L, BELMAHI M, CELLIER J, SAUVAGE S, TOMASELLA E, NRA and ERDA powerful tools to investigate the role of Hydrogen on optical properties in SiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>:H thin films deposited by reactive sputtering. International Conference on Plasma Surface Engineering -, in Garmisch-Partenkirchen, Germany, September 12 - 16, 2016, Oral
285. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., ANNALORO J., OMALY P., Atmospheric entry of space debris: oxidation and emissivity data for model implementation, 8th Int. Asso. Advancement of Space Safety IAASS Conf., Melbourne (FL, USA), 18-20 May 2016, "Safety first, safety for all" proceed. 526-534.
286. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., SANS J.L., ANNALORO J., Atmospheric entry of space debris: influence of oxidation and emissivity in the calculation of the spacecraft survivability, 14th Eur. Conf. Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing ECSSMET 2016, Toulouse (France), 27-30 sept. 2016
287. BALAT-PICHELIN M., PANERAI F., HELBER B., CHAZOT O., Aerothermodynamics behavior of the IXV's TPS tested in ground facilities for atmospheric re-entry conditions, 8th Eur. Work. Thermal Protection Systems & Hot Structures, Noordwijk (Netherlands), 19-22 April 2016
288. BEAUVOIS G., CAUSSANEL M., LUPI J.-F., UDE M., TRZESIEN S., DUSSARDIER B., DUVAL H., GRIEU S., Presentation and preliminary results of DROID project: development of a distributed optical fibre dosimeter. 11th International Symposium on SiO<sub>2</sub>, Advanced Dielectrics and Related Devices, Nice, France, 13-15 juin 2016.
289. BELLOUARD Q., ABANADES S., RODAT S., DUPASSIEUX N., A high temperature drop-tube and packed-bed solar reactor for continuous biomass gasification, SolarPaces 2016, Abou Dabi (EAU), 11–14 oct. 2016, publié dans: AIP Conference Proceedings 1850, 100001 (2017).
290. BELLOUARD Q., DUPASSIEUX N., RODAT S., GRATEAU M., FROMENT K., ABANADES S., Solar fuels from gasification of beech wood biomass using metal oxide, 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, WasteEng2016, Albi (France) 23-26 mai 2016
291. BENBELGACEM J., NOUJRI M., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Investigation of various copper and sulfur sources influence on the properties of CuInS<sub>2</sub> nanoparticles synthesized by solvothermal route, 10èmes JOURNEES MAGHREB-EUROPE, MADICA 2016, Mahdia, Tunisie, 9 – 10 November (2016)
292. BICHOTTE M., DUBOST L., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., GLÉNAT H., ITSKHOKINE D., Arc deposited TiAlN selective absorber for high temperature CSP applications, AIP Conf. Proc. 1734 (2016) 030006-1–9 (SolarPACES 2015).
293. BICHOTTE M., KÄMPFE T., IFF W., CELLE F., REYNAUD S., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., DUBOST L., JOURLIN Y., Diffractive gratings to improve solar thermal absorbers. European Optical Society Bi-Annual Meeting (EOSAM 2016), Berlin, Germany, 26 - 30 September 2016, Oral
294. BICHOTTE M., KÄMPFE T., IFF W., CELLE F., REYNAUD S., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., JOURLIN Y., DUBOST L., Improvement of solar absorption using submicrometric gratings, IEEE Xplore Digital Library SPIE (2016) 9898, Photonics for Solar Energy Systems VI 989800 (SPIE Photonics 2016).
295. BICHOTTE M., KÄMPFE T., IFF W., CELLE F., REYNAUD S., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., JOURLIN Y., DUBOST L., Improvement of solar absorption using submicrometric gratings. SPIE Conference on Photonics for Solar Energy Systems, Brussels, Belgium, 5 - 7 April 2016, Oral
296. BOIS G., MATHIEU B., FAUCHET G., TOUTANT A., DNS of a turbulent steam/water bubbly flow in a vertical channel, ICMF 2016 International Conference on Multiphase Flow, Firenze, Italy, May, 2016.
297. BOISVERT J.-S., MARGOT J. MASSINES F., "Effect of the Modulation on a Helium DBD in the Medium-Frequency Range at Atmospheric Pressure", HAKONE XV, Brno, September 11-16, 2016, République Tchèque.
298. BOUCHAMA I., DJESSAS K., BOULOUBA A., FAYCAL D., Study on the properties of annealed CIGS thin films depending on different deposition temperatures, European Materials Research Society (E-MRS 2016 Spring Meeting), Lille, France, 02-06 Mai (2016)
299. CAUSSANEL M., BEAUVOIS G., DUVAL H., GRIEU S., MONTAY G., GILARD O., Radiation-induced attenuation of polarization maintaining fibers. International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems (ISROS) 2016, Otwock, Poland, June 6-9, 2016.
300. CHABAUD A., EYNARD J., GRIEU S., Gestion prédictive d'un micro-réseau résidentiel. 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM), Montréal, Canada, 22-24 août 2016.
301. CHABAUD A., EYNARD J., GRIEU S., Impact de la disponibilité de la ressource énergétique sur la gestion d'un micro-réseau résidentiel. 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM), Montréal, Canada, 22-24 août 2016.
302. CHAUVIN R., NOU J., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., Estimation de l'éclairement normal direct par ciel clair. 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM), Montréal, Canada, 22-24 août 2016.
303. CHAUVIN R., NOU J., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., Préviation infra-horaire de l'éclairement normal direct pour la gestion de centrales CSP. 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM), Montréal, Canada, 22-24 août 2016.
304. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S., A new approach for assessing the clear-sky direct normal irradiance in real-time. 2016 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (E3E), Florence, Italie, 6-8 juin 2016.
305. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S., A new approach for assessing the clear-sky DNI in real-time. 22th SolarPACES Conference, Abu Dhabi, EAU, 11-14 octobre 2016.

306. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S., Short-term DNI forecasting using a sky-imager. 22th SolarPACES Conference, Abu Dhabi, EAU, 11-14 octobre 2016.
307. COQUAND M., CALIOT C., HENAULT F., Backward-gazing method for heliostats shape measurement and calibration. Proceedings of SolarPaces 2016 Conference, 11–14 Oct. 2016, Abu Dhabi (EAU)
308. COQUAND M., CALIOT C., HENAULT F., Backward-gazing method for measuring heliostat shape errors. In: Light, Energy and Environment, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2016), paper SoM3C.2, Liepzig, Germany, 2016.
309. COURTY M.-A., Adjusting soil micromorphology to characterize the durable natural and anthropic ancient surfaces made from natural polymers. 15th ICSM, New Mexico, Mexico, 27 november-December 2 2016.
310. COURTY M.-A., and MARLIN C., The role of abiotic carbonaceous filaments on the long term stability of cryosols in Spisbergen, 15th ICSM, New Mexico, Mexico, 27 november-December 2 2016.
311. COURTY M.-A., ANDRE P., MARTINEZ J.-M., BUSSIÈRE W. et PICCOLI R., Atmospheric production of nanostructured particulate matter by lightning strikes. DUST 2016, the 2nd International Conference on Atmospheric Dust, 12-17 juin 2016, Castellaneata Marina, Italie.
312. COURTY M.-A., CHANTREAU Y. and MACPHAIL R., Diagnostic tool-kit of natural and human firing records : a pilote study of Menez Dregan (Brittany) and Boxgrove (West Sussex) Middle Pleistocene pedo-sedimentary sequences. 15th ICSM, New Mexico, Mexico, 27 november-December 2 2016.
313. COURTY M.-A., CROSTA X., WASSMER P., ANDRE P., MARTINEZ J.-M., BUSSIÈRE W. et PICCOLI R., Tracking the role of atmospheric plasmas at the Earth's surface using the 4 kyr BP mega-dust event. DUST 2016, the 2nd International Conference on Atmospheric Dust, 12-17 juin 2016, Castellaneata Marina, Italie.
314. COURTY M.-A., ANDRE P., MARTINEZ J.-M., GERAUD-GRENIER I., MASSEREAU-GUILBAUD V., BUSSIÈRE W. et PICCOLI R. Single particle analysis of plasma-linked atmospheric debris. Atmospheric production of nanostructured particulate matter by lightning strikes. DUST 2016, the 2nd International Conference on Atmospheric Dust, 12-17 juin 2016, Castellaneata Marina, Italie.
315. CURE J., PIETTRE K., COPPEL Y., BECHE E., ESVAN J., COLLIÈRE V., CHAUDRET B., FAU P., Solution Layer Deposition Solution Layer Deposition: A liquid ALD technique to graft metal oxide layers on Silica substrate, 6th EuCheMS, Seville, (Spain), September 11-15th, 2016.
316. DIAGO M., CRESPO INIESTA A., DELCLOS T., SOUM-GLAUDE A., SHAMIM T., CALVET N., Characterization of Desert Sand as a Sensible Thermal Energy Storage Medium. AIP Conf. Proc., 1734, pp.050011-1–9, 2016
317. DUPUY D., TOUTANT A., BATAILLE F., Study of the sub-grid terms of the large eddy simulation of a low Mach strongly anisothermal channel flow, Eurotherm 106, Paris, France, October, 2016.
318. FASQUELLE T., FALCOZ Q., NEVEU P., BOULLET N., LECAT F., FLAMANT G., Operating results of a thermocline thermal energy storage included in a parabolic trough mini power plant. Solarpaces International Conference,, Abu Dhabi, Unites Arabic Emirates, October 2016.
319. FITO J., MAURAN S., STITOU D., MAZET N., CORONAS A., Solar-driven hybrid absorption-thermochemical refrigeration systems: Performance estimation, 12th Int Institute of Refrigeration - Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Refrigeration Science and Technology, 1, pp 407-414, ISBN: 978-1-5108-2943-5, 21-24 August 2016 Edinburgh, UK (2016).
320. GAËLLE K., NEVEU P., EDEM N'TSOUKPOE K., COULIBALY Y., Dynamic Modeling and Adapted Design of a Low Cost Linear Fresnel Power Plant for Rural Areas in West Africa, SolarPACES, 11 - 14 October 2016, Abu Dhabi, UAE, 11 - 14 October 2016.
321. GIUDICELLI E., MARTAJ N., DOLLET A., PERONA A., PINCEMIN S., CUMINAL Y., Solar cells based on GaAs: Thermal behavior study, 11th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems CPV-1, Proceeding 1679, 020002, Aix-les-Bains, April 13-15 2015,
322. GROSJEAN A., SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., NEVEU P., Coatings layers optimization following a solar spectrum inside 2D solar thermal collectors. 22th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2016), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 11 - 14 October 2016, Poster
323. HOANG J.P., BAZINETTE R., GAUDY L., MAGNAN R., BRUNET P., MASSINES F., Is dual frequency a solution for atmospheric pressure sputtering and nanocomposite thin film deposit?, Gordon conference, 24-28 juillet 2016, Proctor (USA)
324. KENDA E.S., PYX., SADIKI N., N'TSOUKPOE K.E., COULIBALI Y., AZOUMAH Y., Elaboration of dense Refractory Ceramics from Recycle and Natural Materials Used as Thermal Energy Storage Materials for CSP in West Africa. 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Albi France, May 23–26, 2016.
325. LAHLALI S., BELAQZIZ M., CHEHOUANI H., ESSALEH L., DJESSAS K., MEDJOUN K., Analysis of Low Temperature Electrical Conduction in Thin Film Photoabsorber Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub>, IRSEC'16: 4 the International Renewable and Sustainable Energy Conference, Marrakech, Morocco, November 14-17, (2016)
326. LAHLALI S., BELAQZIZ M., ESSALEH L., CHEHOUANI H., DJESSAS K. AND GAUFFIER J.L., Electrical conduction process by impedance spectroscopy of the nanostructured photoabsorbers Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub>, 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, Germany, 20-24 june (2016)
327. LAKBITA O., RHOUTA B., MAURY F., PLANTARD G. and GOETZ V., Solar Photoactivity of TiO<sub>2</sub>-Palygorskite Nanocomposite Photocatalyst, SPEA 9 (9th European meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications), Strasbourg, France, 13-17 June, 2016.
328. LALAU Y., FAUGEROUX O., CHOTARD T., PROUST A., ANDRE D., CLAUDET B., HUGER M., GUILLOT E., OLALDE G., In situ thermo-mechanical diagnostics of materials subjected to high solar flux: Test device development, HTMC XV 15th Int. IUPAC conference on High Temperature Materials, March 2016, Orléans, France
329. LECOMTE P., BLAIRON S., BOLDO D., TAILLADE F., CAUSSANEL M., BEAUVOIS G., DUVAL H., GRIEU S., LAFFONT G., LAINE F., CARREL F., High temperature measurements in irradiated environment using Raman fiber-optics distributed temperature sensing. Optical Sensing and Detection IV, Bruxelles, Belgique, 3-7 avril 2016. Dans : Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering 9899 (2016).
330. LERAY C., FERRIERE A., TOUTANT A., OLALDE G., PEROY J.Y., CHEREAU P., FERRATO M., Design and Proof of concept of an innovative very high temperature ceramic solar absorber, SolarPaces, Abu Dhabi, October, 2016.

331. LOPEZ-FERBER N., GOETZ V., NZIHOU A., FALCOZ Q., PHAM-MINH D., MEFFRE A., Development of thermal energy storage ceramics from municipal waste incinerator bottom ash (MWIBA), WasteEng, 6th International Conference on engineering for Waste and Biomass Valorization, Albi, France, 23-26 May, 2016.
332. MAHDHI H., GAUFFIER J.L., DJESSAS K., BEN AYADI Z., Effect of thickness on the structural, optical and electrical properties of ZnO:Ga films deposited by rf magnetron sputtering, 10èmes JOURNEES MAGHREB-EUROPE, MADICA 2016, Mahdia, Tunisie, 9 – 10 November (2016)
333. MASSINES F., BRUNET P., MARTINEZ J.M., RINCON R., HENDAOU A., GAUDY L., CHAKER M., Plasma based aerosol processes for nanocomposite thin film deposition at low temperature and atmospheric pressure. 22nd European Aerosol Conference, EAC 2016, Sept. 4-9 2016, Tours (France)
334. MEDJOUN K., DJESSAS K., GAUFFIER J.L., GRILLO S., SOLHY A., CHEHOUANI H., ESSALEH L., Growth of nanostructured thin films of Zn<sub>1-x</sub>VxO using rf-magnetron sputtering with low and high vanadium loading: physico-chemical characterization, optical and electrical properties evaluation, IRSEC'16: 4th International Renewable and Sustainable Energy Conference, Marrakech, Morocco, November 14-17, (2016)
335. MENDIL R., BEN AYADI Z., DJESSAS K., Effect of sputtering power on the structural, morphologic and optical properties of ZnS thin films sputtered from nanopowders compacted target, 10èmes JOURNEES MAGHREB-EUROPE, MADICA 2016, Mahdia, Tunisie, 9 – 10 November (2016)
336. MILANIAK N., BERTRAND G., MASSINES F., LAROCHE G., Innovative, plasma-based method for depositing multifunctional nanostructured thin films on the interior of a vascular graft, 10th Int. Workshop on microplasmas, IMW-10, May 20-24, 2019, Kyoto, Japan
337. MOUHOUB A., BOULOUBA A., DJESSAS K., MESSOUS A., Effect of the ODC thin layer on bifacial solar cells based on CuIn<sub>1-x</sub>GaxSe<sub>2</sub> thin films absorbers: Device modeling approach, Fourth European Conference on Renewable Energy (ECRES), Istanbul, Turkey, 28-31 August (2016)
338. NAHHAS T., OLIVES R., GREGOIRE S., PY X., Influence of temperature on properties of flint rocks used as filler materials for Concentrated Solar Power Plants. 15th International Conference on High Temperature Materials Chemistry, Orléans, France, 29 Mars-1st April, 2016.
339. NAHHAS T., PY X., BESSADA C., ECHEGUT P., Required characterizations to qualify the use of basalt rock as potential filler material in future energy storage applications. Materials for Energy and Sustainability Conference, Erice, Italy, 7-12 July, 2016.
340. NAHHAS T., PY X., SADIKI N., GREGOIRE S., BESSADA C., ECHEGUT P., Basalt rocks characterization as potential material for thermal energy storage application in concentrated solar power plants. Solarpaces, Abu Dhabi UAE, 11-14 October, 2016.
341. PARENT L., RIVEROLA A., CHEMISANA D., DOLLET A. and VOSSIER A., "Fine-tuning of multi-junction solar cells: a theoretical assessment", 11th ISES Eurosun Conference, Palma de Mallorca (Spain), 11 – 14 October 2016, ISES Conference Proceedings (2016) 9pp
342. PLANTARD G., GOETZ V., Correlation between specific surface and photocatalytic performances of media integrated in a photo-reactor, SPEA 9 (9th European meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications), Strasbourg, France, 13-17 June, 2016 .
343. PLUJAT B., GLÉNAT H., BOUSQUET A., HAMON J., MENORET T., GOULLET A., TOMASELLA E., HERNANDEZ E., QUOIZOLA S., THOMAS L., Influence of deposition time on microwave TMS/NH<sub>3</sub> PECVD of a-SiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>:H thinfilms: from gas phase to material chemistry and properties analysis, PSE 2016 Garmish-Partenkirchen, Germany, 12-15/9/2016.
344. PLUJAT B., THOUVENIN A., AHMAD A., HUGON R., BELMAHI M., QUOIZOLA S., HERNANDEZ E., THOMAS L., Comparative study of two microwave plasma excitations used for SiCN:H thin film deposition with Si(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub> in Ar/NH<sub>3</sub> and Ar/N<sub>2</sub>, E-MRS Spring Meeting, 2-6 may 2016, Lille
345. PY X., OLIVES R., GOETZ V., FALCOZ Q., SADIKI N., Thermal Energy Storage for CSP (Concentrating Solar Power), 16 July 2016, Summer School Erice, Italie, April 26 2016.
346. PY X., OLIVES R., GOETZ V., FALCOZ Q., SADIKI N., Thermal energy storage using rocks, from Paleolithic to CSP technologies. European Materials Research Society, AMREN-2 of the E-MRS 2016 Spring Meeting, Lille AMREN-2 E-MRS Lille, France 2016.
347. PY X., SADIKI N. and OLIVES R., High temperature and conductive thermal energy storage materials made of SiC ceramic from industrial wastes, a review. 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Albi, France, May 23–26, 2016.
348. RODAT S., BELLOUARD Q., ABANADES S., FROMENT K., GRATEAU M., DUPASSIEUX N., Hydrogen production from solar-driven biomass gasification in a high-temperature continuously-fed solar reactor, 21st World Hydrogen Energy Conference 2016, Saragosse (Espagne) 13-16 juin 2016
349. ROMERO-PAREDES H., ALVARADO-GIL J.J., ARANCIBIA-BULNES C.A., RAMOS-SÁNCHEZ V.H., VILLAFÁN-VIDALES H.I., ESPINOSA-PAREDES G., ABANADES S., Solar fuels production as a sustainable alternative for substituting fossil fuels: COSOL<sub>T</sub> project, SolarPaces 2016, Abou Dhabi (EAU), 11–14 oct. 2016, publié dans: AIP Conference Proceedings 1850, 100015 (2017).
350. SESHIE Y.M., N'TSOUKPOE E. K., NEVEU P., AZOUMAH Y. K., Solar cavity design for a central receiver system, Int. Conf. on Renewable Energy (INCORE2016), February 3-6, 2016, Cairo (Egypte)
351. SHEN J., NEVEU P., SHU S., FALCOZ Q., Geometry optimization of a latent heat thermal energy storage unit using RT27. 5th International Conference on Environment, Materials, Chemistry and Power Electronics (EMCPE 2016), Zhengzhou, China, April 11-12, 2016.
352. SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., BICHOTTE M., DUBOST L., Thermal stability and durability studies of tandem TiAlN high temperature solar selective coatings. 22th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2016), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 11 - 14 October 2016, Poster
353. SOUM-GLAUDE A., STOLARZ J., LE GAL A., DI GIACOMO L., BICHOTTE M., QUOIZOLA S., DUBOST L., THOMAS L., On Aging Protocols For Estimating Thermal Stability And Durability Of High temperature solar selective coatings, SOLARPACES, 13-16 october 2015, Cape town, South Africa
354. TELEGGANG CHEKEM C., RICHARDSON Y., DROBEK M., BLIN J. and GOETZ V., From tropical biomasses residues to carbonaceous photocatalysts: An opportunity for solar water treatment in subsaharian areas. WasteEng, 6th International Conference on engineering for Waste and Biomass Valorization, Albi, France, 23-26 May, 2016.
355. TOMASELLA E., BACHAR A., BOUSQUET A., ROBERT-GOUMET CH., MONIER G., THOMAS L., BELMAHI M., GOULLET A., CELLIER J., SAUVAGE T., SiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>:H thin films deposited by plasma processes: opportunity as optical coatings for PV applications, PSE 2016 Garmish-Partenkirchen, Germany, 12-15 september 2016.
356. VILLAFAN-VIDALES H.I., ABANADES S., ARANCIBIA-BULNES C.A., ROMERO-PAREDES H., An Analysis of the Carbothermic Reduction of Tungsten Oxide for Solar Fuels Production, 2016 AIChE Annual Meeting, San Francisco (CA, USA), 13-18 nov. 2016
357. ZAHER A., N'GORAN Y., THIERY F., GRIEU S., TRAORE A., Fuzzy rule-based model for optimum orientation of solar panels using satellite image processing. 13th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Lille, France, 17-18 novembre 2016.
358. ZEITOUNY J., DOLLET A., VOSSIER A., "Combining Sunlight Concentration and Angular confinement: Studying the Effects of Series Resistance and External Fluorescence Efficiency", 12th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, 25-27 April 2016, Freiburg, Germany, AIP Conference Proceedings 1766, 080008 (2016).

359. AGAGNA B., SMAILI A., FALCOZ Q., Coupled simulation method by using MCRT and FVM techniques for performance analysis of a parabolic trough solar collector, 3rd International Conference on Renewable Energy and Development, September 2017, Berlin, Germany
360. AGAGNA B., SMAILI A., FALCOZ Q., Optical and Thermal Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector Through Coupling MCRT and FVM Techniques, 5th International Renewable and Sustainable Energy Conference, December 2017, Tangier, Morocco
361. AGAGNA B., SMAILI A., FALCOZ Q., BEHAR O., Experimental and numerical study of parabolic trough solar collector of MicroSol-R tests platform, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 98, 251-266 (2018)
362. AL HALLAK Z., AHMAD A., NAJA A., HUGON R., GLÉNAT H., EASWARAKHANTHAN T., THOMAS L., BELMAHI M., Hybrid ECR and RF magnetron sputtering plasmas used for SiCN:H thin films deposition with TMS/Ar/N<sub>2</sub> feed gases", ITFPC 2017, Nancy, France, 23-27 Octobre, Poster 2017
363. AL HALLAK Z., AHMAD A., NAJA A., HUGON R., THOMAS L., BELMAHI M., Deposition of SiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>:H thin films by low pressure ECR plasma enhanced CVD, CIP 2017, Nice, France, 26-30 juin 2017, Poster
364. ANDRÉ L., ABANADES S., CASSAYRE L., Mixed Co, Cu and Mn-based metal oxides for thermochemical energy storage application, SolarPaces 2017, Santiago du Chili (Chili) 26-29 sept. 2017. Publié dans: AIP Conference Proceedings 2033, 100003 (2018).
365. ANDRE P., COURTY, M.-A. & MARTINEZ, J.-M., Linking the physics of lightning with the properties of plasma nanocomposites using laboratory electric arcs. 2nd International Symposium on Lightning and Storm Related Phenomena, Aurillac, France, May 10-11, 2017.
366. BACHAR A., BOUSQUET A., MEHDI H., MONIER G., ROBERT-GOUMET C., THOMAS L., BELMAHI M., GOULLET A., SAUVAGE T., TOMASELLA E., Composition and optical properties tunability of hydrogenated silicon carbonitride deposited by reactive magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.*, 444 (2018), 293-302
367. BACHAR A., BOUSQUET A., ROBERT-GOUMET C., MONIER G., THOMAS L., BELMAHI M., GOULLET A., TOMASELLA E., Association of radiofrequency magnetron sputtering and microwave plasma for a-SiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>:H films deposition: process study and correlation with the films properties, 21st International Colloquium on Plasma processes, Nice, France, 26-30 juin 2017, Oral
368. BALAT-PICHELIN M., BOUSQUET A., Total hemispherical emissivity of sintered SiC up to 1850 K in high vacuum and in air at different pressures, *J. Eur. Ceram. Soc.* 38, 2018, 3447-3456.
369. BARKA L., BALAT-PICHELIN M., ANNALORO J., OMALY P., Oxidation laws and emissivity data at high temperature for implementation in DEBRISK code, 9th Int. Asso. Advancement of Space Safety IAASS Conf., Toulouse (France), 18-20 Oct. 2017
370. BARKA L., BALAT-PICHELIN M., BECHE E., SANS J. L., ANNALORO J., OMALY P., Oxidation laws and emissivity data at high temperature for implementation in DEBRISK code, 9th Int. Asso. Advancement of Space Safety IAASS Conf., Toulouse (France), 18-20 oct. 2017
371. BARKA L., BALAT-PICHELIN M., SANS J.L., ANNALORO J., OMALY P., Influence of oxidation and emissivity for metallic alloys space debris during their atmospheric entry, 7th Eur. Conf. Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt (Allemagne), 18-21 avril 2017
372. BEAUVOIS G., CAUSSANEL M., DUVAL H., GRIEU S., MONTAY G., GILARD O., Radiation-induced attenuation data of polarization-maintaining fibres. 2017 Radiation Effects on Components and Systems (RADECS) Conference, Genève, Suisse, 2-6 octobre 2017.
373. BEHAR O., FERRIERE A., VOLUT Y., Off Design Performance and Operation Strategies of Hybrid Solar Gas Turbine, SolarPACES 2017, Santiago de Chile
374. BELLOUARD Q., ABANADES S., RODAT S., FRAYSSINES P.E., RAVEL S., Design and experimental study of a novel solar chemical reactor for hydrogen production from continuous solar-driven biomass gasification, 7th World Hydrogen Technology Convention (WHTC 2017), Prague (Rép. Tchèque), 9-12 juil. 2017
375. BICHOTTE M., KÄMPFE T., IFF W., CELLE F., REYNAUD S., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., KEILANY M.A., DUBOST L., JOURLIN Y., Diffractive gratings to improve TiAlN based spectrally selective solar absorbers. 23th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2017), Santiago, Chile, 26 - 29 September 2017, Oral
376. BOIS G., DU CLUZEAU A., TOUTANT A., MARTINEZ J.M., DNS of Turbulent Bubbly Flows in Plane Channels using the Front-Tracking algorithm of TrioCFD, ASME Fluids Engineering Division Summer Conference (FEDSM), Waikoloa, Hawaii, 2017.
377. CALIOT C., BLANCO S., COUSTET C., EL HAFI M., EYMETC V., FOREST V., FOURNIER R., PIAUD B., Combined conductive-radiative heat transfer analysis in complex geometry using the Monte Carlo method. In: Proceedings of the ECOS 2017 Conference, San Diego, CA, USA, 2017.
378. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S., Generating high dynamic range images using a sky imager. 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Toulouse, France, 9-14 juillet 2017.
379. CHAUVIN R., NOU J., THIL S., GRIEU S., Generating high dynamic range images using a sky imager. 23th SolarPACES Conference, Santiago du Chili, Chili, 26-29 septembre 2017.
380. CHONGZHE Z., YANPING Z., FALCOZ Q., NEVEU P., LI J., CHENG Z., Thermal modeling of a pressurized air cavity receiver for solar dish Stirling system, AIP Conference Proceedings, 1850, 030053 (2017)
381. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Co-production of syngas and zinc via combined solar-driven biomass gasification and ZnO carbothermal reduction in a continuously-operated solar reactor, SolarPaces 2017, Santiago du Chili (Chili), 26-29 sept. 2017. Publié dans: AIP Conference Proceedings 2033, 130004 (2018).
382. COQUAND M., CALIOT, F. HENAUULT, Tracking and shape errors measurement of concentrating heliostats, Proceedings of the SPIE 10379, Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIV, 103790N, 2017
383. COQUAND M., F. HENAUULT, CALIOT. Numerical identification of mirror shapes with the Backward-Gazing method using an actual solar profile. Proceedings of SolarPaces 2017 Conference, Santiago du Chili, Chili, 2017.
384. COURTY M.-A., ANDRE P., PICCOLI R. & MARTINEZ J.-M., Nanocomposites tracing the phenomenology of aerosol-lightning interactions: Part 2. Database. ICAC Lille, France, 21-23 mars 2017.
385. COURTY M.-A., BRUNET P. HAMDAN A., BELMONTE T. & MARTINEZ J.-M. Nanocomposites tracing the phenomenology of aerosol-lightning interactions: Part 1. Laboratory plasma experimentation, ICAC Lille, France, 21-23 mars 2017.

386. COURTY M.-A., CAUMON, L., MARTINEZ, J.-M. Approaching effects of lightning processes on humans. 2nd International Symposium on Lightning and Storm Related Phenomena, Aurillac, France, May 10-11, 2017.
387. COURTY M.-A., PICCOLI R., & MARTINEZ, J.-M. Lightning signatures at the ground : present records and past archives. 2nd International Symposium on Lightning and Storm Related Phenomena, Aurillac, France, May 10-11, 2017.
388. DEZANI C., GOETZ V., CALAS-BLANCHARD C., LACORTE S., JOANNIS-CASSAN C., PLANTARD G., Innovative hybrid process coupling biodegradation and solar photo-oxidation for the removal of pharmaceutical residues from wastewater of retirement homes , 10th World Congress of Chemical Engineering, Barcelone, Spain, 1-5 Octobre, 2017.
389. DU CLUZEAU A., BOIS G., TOUTANT A. AND MARTINEZ J.-M., Surface tension energy in bubbly flows: physical impact and modelling in RANS Eulerian-Eulerian two-fluid model, 15th Multiphase Flow Conference and Short Course: Simulation, Experiment and Application, Dresden, Germany, 14-17 November, 2017.
390. DUVERGER, E., PENIN, C., ALEXANDRE, P., THIERY, F., GACHON, D. AND TALBERT, T., «Irradiance Forecasting for Microgrid Energy Management», ISGT Europe IEEE PES International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe 2017), Turin, Italie, 2017
391. ESENCE T., FASQUELLE T., BRUCH A., FALCOZ Q., Experimental Investigation of the Solid Filler Influence in Thermocline Storage Systems through the Comparison of Two Different Setups, Solarpaces International Conference, Santiago, Chile, September 26-29 2017.
392. FAVE A., LELIEVRE J-F, GALLET T., SU Q., LEMITI M., Fabrication of Si tunnel diodes for c-Si based tandem solar cells using proximity rapid thermal diffusion", Energy Procedia 124, pp. 577-583 (2017) - "7th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2017", Freiburg (Germany) (2017)
393. FERRUCCI F., STITOU D., ORTEGA P., LUCAS F., Mechanical compressor-driven thermochemical storage for cooling applications in tropical insular regions, . 9th Int. Conf. on Applied Energy, ICAE 2017, Energy Procedia, 21-24 August 2017, Cardiff, UK, (2017)
394. FERRUCCI F., STITOU D., ORTEGA P., LUCAS F., Photovoltaic-Driven Thermochemical Storage for Cooling Applications: Concept and Efficiency Study. Int. Sorption Heat Pump Conf. ISHPC 2017, Aug. 7-10-2017 Tokyo, Japan (2017)
395. GAZAL Y, PLUJAT B, BACHAR A, CARDINAUD C, GOULLET A, GRANIER A, BOUSQUET A, TOMASELLA E, QUOIZOLA S, THOMAS L, In situ xps characterisation of the first growth steps of SiCN:H thin films from tetramethylsilane-ammonia microwave plasmas, French Symposium on Emerging Technologies for micro-nanofabrication, Orléans, France, Nov 20-22, 2017, Oral
396. GAZALY, PLUJAT B, CARDINAUD C, QUOIZOLA Q, HAMON J, HERNANDEZ E, BOUSQUET A, GRANIER A, GOULLET A, THOMAS L, Study of the first growth steps of carbonitride SiCN:H films deposited from Tetramethylsilane / Ammonia microwave plasmas, 21st International Colloquium on Plasma processes, Nice, France, 26-30 juin 2017, Oral
397. GIRAUD P., RACCURT O., BARRIGA J., ECHEGUT P., DE SOUSA MENESES D., SCITI D., SOUM-GLAUDE A., ESCAPE C., JERMAN I., LARSEN R., NØRGAARD J., LOPEZ G.A., ECHANIZ T., TELLO M.J., MATINO F., SANI E., Round Robin Test for the Comparison of Emittance Measurement Apparatuses. 23th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2017), Santiago, Chile, 26 - 29 September 2017, Poster
398. GROSJEAN A., SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., NEVEU P., Coating optimization for CSP with different solar spectra. 23th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2017), Santiago, Chile, 26 - 29 September 2017, Poster
399. H FENG, Y ZHANG, C ZOU, Q FALCOZ, P NEVEU, Geometric Optimization of a Solar Cavity Receiver Using 3-D Numerical Simulation: Ambient Disturbance Analysis, Solarpaces International Conference, October 2017, Santiago, Chile
400. KO G., N'TSOUKPOE K.E., COULIBALY Y., FALCOZ Q., Optical and thermal characterization of a linear Fresnel collector in Burkina Faso, Solarpaces International Conference, Santiago, Chile, September 26-29 2017.
401. KRASNOSELSKIKH V., TSURUTANI B.T., VELLI M., MAKSIMOVIC M., BALIKHIN M., DUDOK DE WIT T., KRETZSCHMAR M. and the ICARUS Team, ICARUS mission, next step of coronal exploration after Solar Orbiter and Solar Probe Plus, EGU General Assembly EGU-2017, Vienne (Autriche), 23-28 Avril 2017, Geophysical Research Abstracts, 19, EGU2017-3971-3, 2017
402. LALAU Y., FAUGEROUX O., GUILLOT E., HUGER M., PROUST A., CHOTARD T., CLAUDET B., IMPACT: A New Device for Thermo-Mechanical Investigation on Central Receiver Materials. 23th SolarPACES Conference, Santiago de Chile, Chile, September 26-29, 2017.
403. LERAY C., FERRIERE A., TOUTANT A., OLALDE G., PEROY J-Y., CHEREAU P., FERRATO M., Design and proof of concept of an innovative very high temperature ceramic solar absorber, AIP Conference Proceedings 1850, 2017, 030032; doi: 10.1063/1.4984375
404. MEDJNOUN K., DJESSAS K., GRILLO S.G., Effects of thickness variation on properties of Zn0.99B0.01O thin films grown by rf-Magnetron sputtering deposition from nanoparticles target, IRSEC'17, 5th International Renewable and Sustainable Energy Conference, December 04-07, Tangier, Morocco, (2017)
405. NOU J., CHAUVIN R., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., Towards the short-term forecasting of direct normal irradiance using a sky imager. 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Toulouse, France, 9-14 juillet 2017.
406. NOU J., CHAUVIN R., THIL S., GRIEU S., A new approach to the intra-hour forecasting of direct normal irradiance using sky-imaging data. 23th SolarPACES Conference, Santiago de Chile, Chile, September 26-29, 2017.
407. OLIVES R., MEY-CLOUTIER Sébastien, MANCAUX J.M., Irreversibility of latent heat thermal energy storage : entropy analysis of cyclic transformations, SolarPaces 2017, Santiago du Chili, Chili, 26-29 September 2017
408. PICHE P., HAILLOT D., GIBOUT S., ARRABIE C., LAMALICE A., ROUSSE D., PY X., On the way to developing northern greenhouses adapted to population and climate: energy issues. International Congress Arctic Change, Quebec, 11-15 december 2017.
409. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., BECHE E., Solar metallurgy for the production of Al and Mg particles, SolarPaces 2017, Santiago du Chili (Chili), 26-29 Sept. 2017. Publié dans: AIP Conference Proceedings 2033, 140002 (2018)
410. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., Production of Mg and Al using concentrated solar energy for future fuel applications, 9th Eur. Metall. Conf. EMC 2017 'Production and Recycling of Non-Ferrous Metals: Saving Resources for a Sustainable Future', Leipzig (Allemagne) 25-28 Juin 2017
411. RODAT S., BELLOUARD Q., ABANADES S., FRAYSSINES P.E., RAVEL S., A novel high-temperature solar chemical reactor for syngas production from solar-driven thermochemical gasification of wood biomass, SolarPaces 2017, Santiago du Chili (Chili), 26-29 sept. 2017. Publié dans: AIP Conference Proceedings 2033, 130012 (2018).

412. RODRIGUEZ C., DEZANI C., GOETZ V., CALAS-BLANCHARD C., LACORTE S., JOANNIS-CASSAN J., PLANTARD G., Innovative hybrid process coupling biodegradation and solar photo-oxidation for the removal of pharmaceutical residues from wastewater of retirement homes. 10th World Congress of Chemical Engineering, Barcelone, Spain, 1-5 Octobre, 2017.
413. SOUM-GLAUDE A., LE GAL A., KEILANY M.A., BICHOTTE M., JOURLIN Y., DUBOST L., Thermal stability and durability studies of tandem TiAlN high temperature solar selective coatings for CSP receivers. Reliability of Solar Materials and Systems (RS2), Marseille, France, 12 May 2017, Oral
414. TALBERT T., «Microgrid management», Tr@nsenr Workshop Barcelona (Tr@nsenr Workshop), Barcelona, Spain, 2017
415. XU H., SADIKI N., DAL MAGRO F., PY X., MANCAUX J.M., ROMAGNOLI A., Compatibility tests between molten Aluminium alloys and recycled ceramics from inorganic industrial wastes. 9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017, Cardiff, UK, 21-24 August 2017.
416. ZAHER A., N'GORAN Y., T.F.G.S. AND ADAMA, T., «Fuzzy rule-based model for optimum orientation of solar panels using satellite image processing», IOP Conf. Series: Journal of Physics., 2017
417. ZAHER A., NOU J., TRAORE A., THIL S., GRIEU S., Comparative study of algorithms for cloud motion estimation using sky-imaging data. 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Toulouse, France, 9-14 juillet 2017.
418. ZEITOUNY J., LALAU N., KATZ E.A., DOLLET A. and VOSSIER A., "On the potential of solar cells to efficiently operate at high temperature", 32th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, 1-3 May 2017, Ottawa, Canada, AIP Conference Proceedings 1881, 080011 (2017).

## 2018

419. AL HALLAK Z, HUGON R, EASWARAKHANTHAN T, THOUVENIN A, PIGEAT P, AHMAD A, NAJA A, THOMAS L, BELMAHI M, FTIR and visible optical characterization of SiCN:H thin films deposited in Ar/TMS/N<sub>2</sub> ECR PECVD plasma, 16th International Conference on Plasma Surface Engineering (PSE 2018), Garmisch-Partenkirchen, Germany, 17 - 21 September 2018, Poster
420. ARENA H., ARRACHAT G., COULIBALY M., SOUM-GLAUDE A., JONCHÈRE A., MESBAH A., PRADEILLES N., MAITRE A., DESCHANELS X., Carbide Nanocomposite TiC-SiC for Bulk Solar Absorbers Applications, 14th International Ceramics Congress (CIMTEC 2018), Perugia, Italy, 4 - 8 June, 2018, Poster
421. ARENA H., SOUM-GLAUDE A., ARRACHAT G., COULIBALY M., JONCHÈRE A., MESBAH A., PRADEILLES N., MAITRE A., DESCHANELS X., TiC-SiC carbide nanocomposites intended as bulk materials for high temperature solar selective receivers, 24th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2018), Casablanca, Morocco, 2 - 5 October 2018, Poster
422. AVILA-MARIN A., J. FERNANDEZ-RECHE, C. CALIOT, M. ALVAREZ DE LARA, CFD Numerical Model for Open Volumetric Receivers with Graded Porosity Dense Wire Meshes and Experimental Validation, Proceedings of SolarPaces 2018 Conference, 2018.
423. BACHAR A, BOUSQUET A, ROBERT-GOUMET CH, MONIER G, SAUVAGE TH, THOMAS L, TOMASELLA E, Influence of radiofrequency magnetron sputtering and microwave plasma combination on the elaboration of SiC<sub>x</sub>Ny:H thin films, 16th International Conference on Plasma Surface Engineering (PSE 2018), Garmisch-Partenkirchen, Germany, 17 - 21 Sept 2018, Oral
424. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., BULTEL A., ANNALORO J., Characterization of space debris materials during their atmospheric entry, 14th Int. Symp. Mater. Space Environ. ISMSE 14, Biarritz (France), 1-5 oct. 2018
425. BELOT M., PHAN T., EUZENAT F., TEIXEIRA D., VINAY G., FALCOZ Q., TOUTANT A., WACHS A., Heat transfer in a fixed bed of particles for energy storage: a multi-scale numerical study, Rio de Janeiro, Brazil, 10-13 July, 2018.
426. BELOT M., VINAY G., FALCOZ Q., TOUTANT A., Study of heat transfer in PCM particle beds for heat storage applications, Euromech, Colloquium 596 Numerical simulations of flows with particles, bubbles and droplets, Venice, Italy, 9-11 May, 2018.
427. BENZAGMOUT A., MARTIRE T., BEAUFILS G., FRUCHIER O., TALBERT T., GACHON D., « Measurement of the I(V) characteristics of photovoltaic arrays by the capacitive load method for fault detection », International Conference on Industrial Technology (ICIT 2018), Lyon, France, 20 au 22 février 2018.
428. BICHOTTE M., KÄMPFE T., IFF W., CELLE F., REYNAUD S., JAMON D., POUIT T., SOUM-GLAUDE A., KEILANY M.A., DUBOST L., JOURLIN Y., Diffractive Gratings to Improve TiAlN Based Spectrally Selective Solar Absorbers, AIP Conf. Proc. 2033 (2018) 040007-1-9
429. BOIS G., DU CLUZEAU A., TOUTANT A., KOMMAJOSYULA R., LEONI N., On the effect of buoyancy on turbulent dispersion in bubbly flows: insights from Direct Numerical Simulations, Dispersed Two-Phase Flows, Toulouse, France, 17-19 September, 2018.
430. BOUJJAT H., RODAT S., ABANADES S., PERRET C., Simulation of biomass gasification in a novel high-temperature hybrid solar/combustion reactor, SolarPaces 2018, Casablanca (Maroc), 2-6 oct. 2018
431. CALIOT C., P.-M. DÉJARDIN, Numerical Demonstration of the Volumetric Effect in a High Specific Surface Absorber with Kelvin Cells, Proceedings of SolarPaces 2018 Conference, 2018.
432. CARLING-PLAZA A., KEILANY M.A., BICHOTTE M., SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., DUBOST L., Demonstration of long term stability in air at high temperature for TiAlN solar selective absorber coatings, 24th Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES 2018), Casablanca, Morocco, 2 - 5 October 2018, Oral
433. CHARPENTIER L., CALIOT C., DAVID P., BAUX A., HEISEL C., ROCHAIS D., CHARTIER T., Influence of the porosity of SiC on its optical properties and oxidation kinetics, SolarPaces 2018, Casablanca (Maroc), 2-6 oct. 2018
434. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Experimental Assessment of Biomass Feedstock Gasification in a High-Temperature Continuous Solar Gasifier, SolarPaces 2018, Casablanca (Maroc), 2-6 oct. 2018
435. COURTY M.-A. and ALLUE E. Forming mechanisms, environmental relevance and cultural implications of vitrified charcoal. EEA 2018 Barcelona, 5-8 septembre 2018.

436. COURTY M.-A. and COQUEUGNIOT E. Ancestral use of plastic nanocomposites for durable earthen architecture EEA 2018 Barcelone, 5-8 septembre 2018.
437. DAN A., SOUM-GLAUDE A., CHATTOPADHYAY K., BARSHILIA H.C., BASU B., Evaluation of solar-thermal conversion efficiency of high temperature spectrally selective multilayer thin film, 12th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications (CMCEE 2018), Singapore, 22 - 27 July 2018, Oral
438. DU CLUZEAU A., BOIS G., TOUTANT A. AND MARTINEZ J.-M., Towards an innovative Rij-epsilon model for turbulence in bubbly flows from DNS simulations, 5th International Conference on Turbulence and Interactions, Martinique, 25-29 June, 2018.
439. DUVERGER E., PENIN C., ALEXANDRE P., THIERY F., GACHON D. AND TALBERT T., « Off-grid Experimental Micro-grid based on Photovoltaic Car Parks », International Conference on Industrial Technology (ICIT 2018), Lyon, France, 20 au 22 février 2018 .
440. DUVERGER E., PENIN C., ALEXANDRE P., THIERY F., ZAHER A., GACHON D. AND TALBERT T., « Modeling and Experimental Set-up of an Microgrid based on Photovoltaic Car Parks », EPE'18 ECCE, Riga, Lettonie, 18-20 septembre 2018.
441. FALCOZ Q., FASQUELLE T., NEVEU P., A dynamic temperature threshold to improve charging efficiency of thermocline thermal energy storage, Solarpaces International Conference, Marrakech, Morocco, 2- 5 octobre 2018,.
442. GODEFROY A., PERIER-MUZET M., MAZET N. Analyse comparative de cycles hybrides innovants impliquant des procédés à sorption, pour le stockage d'énergie thermique, la production de froid et/ou de travail mécanique. Papier n° 162, SFT 2018, Pau
443. GRANGE B., C. CALIOT, G. FLAMANT, Aiming Strategy on the Next-CSP Receiver: Coupling of TABU Search, Ray-Tracing Software Solstice and Thermal Model, Proceedings of SolarPaces 2018 Conference, 2018.
444. H XIAO, Y ZHANG, C ZOU, Q FALCOZ, Optimization of Optical Performance of Conical Cavity Receiver Based on Model Analysis, Solarpaces International Conference, October 2018, Marrakech, Morocco.
445. IBARRART L., C. CALIOT, M. EL HAFI, R. FOURNIER, S. BLANCO, S. DUTOUR, J. DAUCHET, J.-M. TREGAN, V. EYMET, V. FOREST, Combined conductive-convective-radiative heat transfer in complex geometry using the Monte Carlo method: Application to solar receivers. Proceedings of the IHTC-16 Conference, Beijing, 2018.
446. JOUANNAUX J., HAEUSSLER A., DROBEK M., AYRAL A., CHARMETTE C., SERVE A., CARTOIXA B., ABANADES S., JULBE A., Development of dense membranes based on mixed ionic-electronic conducting ceramics for thermochemical production of solar fuels, 15th International Conference on Inorganic Membranes (ICIM), Dresde (Allemagne), 18-22 juin 2018
447. KEILANY M.A., MILHÉ M., BEZIAN J.J., FASQUELLE T., FALCOZ Q., FLAMANT G., Vitriified asbestos waste used as filler material in a thermocline storage tank, 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Prague, Czech Republic, 2-5 July 2018.
448. KO G., FALCOZ Q., COULIBALY Y., E N'TSOUKPOE K., OLIVÈS R., Experimental and numerical characterization of a trapezoidal receiver for a linear Fresnel collector in Burkina Faso, Solarpaces International Conference, October 2018, Marrakech, Morocco.
449. LACROIX C., HACHECHE M. PERIER-MUZET M. , STITOU D., Solar-driven thermo-hydraulic process for reverse osmosis desalination, Proc. of ECOS 2018 - 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, June 17-21 2018, Guimarães, Portugal, paper n°49, (2018)
450. LEMAIRE A., PERONA A., CAUSSANEL M., DUVAL H., DOLLET A., Si and GaAs PV junction design influence on lifetime extractions by OCVD TCAD simulation. Comparison to GaAs Experimental Characterization. 9th PhotoVoltaic Technical Conference (I-PVTC), Cassis, France, 10-12 septembre 2018.
451. LOPEZ-FERBER N., GOETZ V., FALCOZ Q., NZIHOU A., PHAM MINH D., MEFFRE A., HOFFMANN, Air/ceramic packed bed thermocline storage system at pilot scale – influence of operating conditions on system behaviour, 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Prague, Czech Republic, 2-5 July 2018.
452. LOPEZ-FERBER N., PHAM MINH D., NZIHOU A., GOETZ V., FALCOZ Q., TESSIER-DOYEN N., HOFFMANN J.F., MEFFRE A., Innovative ceramic thermal storage material elaborated from municipal incinerator bottom ash, 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Prague, Czech Republic, 2-5 July 2018.
453. MEDJOUN K., DJESSAS K., FAHIMA K., BELAQZIZ M., CHEHOUANI H., comparison Between ZnO:Al and ZnO:B Window Layers For  $\mu$ c-Si solar cells simulated by SCAPS, 6 th International Renewable and Sustainable Energy Conference, December 05-08, Rabat, Morocco, (2018)
454. MEDJOUN K., DJESSAS K., GRILLO S.G, BELAQZIZ M., S. HAMRIT S., SAGNA A., Novel structure of (Zn0.80Mg0.20O/Zn0.99B0.10O) buffer layer/TCO obtained by combination of sol-gel and RF-magnetron sputtering for CIGS solar cells applications, (ISyDMA2018) International Symposium on Dielectric Materials and Applications, April 18-20, Beni Mellal, Morocco, (2018)
455. PETIT M., MARTIRÉÉ T., TALBERT T., « Global optimization of a high step-up DC-DC converter for CPV application », EPE'18 ECCE, Riga, Lettonie, 18-20 septembre 2018.
456. PULLAR R. C., CAETANO A. P. F., OLIVEIRA F. A. C., BARREIROS M. A., ABANADES S., NOVAIS R. M., 3DOM Ceria Ecoceramics from Sustainable Cork Templates for Solar Thermochemical CO2 Splitting, 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation (WasteEng2018), Prague (Rép. Tchèque), 2-5 juil. 2018
457. ROJAS E., CARUNCHO J.M., BRUCH A., FALCOZ Q., RODRÍGUEZ-GARCÍA M.M., BAYÓN R., KARL M., R&D on Thermal Storage in POLYPHEM Project, Solarpaces International Conference, Marrakech, Morocco, 2- 5 octobre 2018
458. TELEGANG CHECKEM C.; GOETZ V. ; RICHARDSON Y. ; PLANTARD G. ; BLIN J., Coupling photodegradation/adsorption properties of AC-TiO2 composite materials, SPEA 10 (10th European meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications), Almería, Spain, 4-8 Mai 2018.
459. THOMAS L., DI GIACOMO L., GROSJEAN A., NGOUE D., PARES V., SOUM-GLAUDE A., QUOIZOLA S., HERNANDEZ E., Development of plasma a-Si(NO)C:H/metal based thermo-optical selective multilayers for thermodynamic concentrated solar power plants, 16th International Conference on Plasma Surface Engineering (PSE 2018), Garmisch-Partenkirchen, Germany, 17 - 21 September 2018, Keynote
460. ZAHER A., TRAORE A., THIERY F., TALBERT T. AND SHAER B., «Optimization of Solar tracking systems», International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE2018), Montreal, Canada, 2018
461. ZOU C., ZHANG Y., FALCOZ Q., ZHANG C., ZENG K., Optical Analysis and Optimization of Cylindrical Cavity Receiver in Solar Dish System, Solarpaces International Conference, October 2018, Marrakech, Morocco.

462. BOUJJAT H., RODAT S., ABANADES S., CHUAYBOON S., Experimental investigation of bed material effects on continuous solar-driven steam gasification of biomass in a conical spouted-bed cavity reactor, 27th European Biomass Conference & Exhibition, EUBCE 2019, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal.
463. BOUJJAT H., RODAT S., CHUAYBOON S., ABANADES S., Combustion-assisted solar gasification of biomass particles in a high-temperature conical jet spouted bed reactor, 25th SolarPACES Conference, SolarPACES 2019, Solar Power & Chemical Energy Systems, October 1-4, 2019, Daegu, South Korea.
464. CARLING-PLAZA A., BICHOTTE M., SOUM-GLAUDE A., KEILANY M.A., DUBOST L., THOMAS L., Aging and durability studies of solar selective absorber coatings in air at high temperature, SFERA III 1st Summer School and Doctoral Colloquium, 9-13/09/2019, Odeillo-France, oral
465. CARLING-PLAZA A., KEILANY M.A., BICHOTTE M., SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., DUBOST L., Demonstration of long term stability in air at high temperature for TiAlN solar selective absorber coatings, AIP Conf. Proc. 2126 (2019) 020001-1-7
466. CHEN D., COLAS J., SU J., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., MERCIER F., PONS M., Aluminium nitride based coatings for high temperature solar receiver systems, 46th Int. Conf. Metallurgical Coatings and Thin Films, ICMCTF 46, San Diego (Ca, USA), 19-24 Mai 2019
467. CHUAYBOON S., ABANADES S., BOUJJAT H., RODAT S., Analysis of the gasification rate of biomass in a continuous particle-fed solar-irradiated gasifier, 27th European Biomass Conference & Exhibition, EUBCE 2019, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal.
468. CHUAYBOON S., ABANADES S., RODAT S., Analysis of process parameters influence on syngas yields and biomass gasification rates in a continuous particle-fed solar-irradiated gasifier, 25th SolarPACES Conference, SolarPACES 2019, Solar Power & Chemical Energy Systems, October 1-4, 2019, Daegu, South Korea.
469. DKHILI N., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., A flexible asset operation strategy for congestion avoidance in electrical distribution grids. 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Gênes, Italie, 11-14 juin 2019.
470. GBEMOU S., TOLBA H., THIL S., GRIEU S., GHI forecasting using online sparse Gaussian process regression based on quasiperiodic kernels. 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Gênes, Italie, 11-14 juin 2019.
471. GODEFROY A., PERIER-MUZET M., NEVEU P., MAZET N. Hybrid thermochemical cycles for low-grade heat storage and conversion into cold and / or power, ECOS, 32nd international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, June 23-28 2019, Wrocław, Poland
472. HAEUSSLER A., ABANADES S., JOUANNAUX J., DROBEK M., AYRAL A., JULBE A., SERVE A., CARTOIXA B., Solar thermochemical splitting of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> using ceria porous foam structures in a high-temperature solar reactor, 47th IUPAC World Chemistry Congress, IUPAC 2019, 5-12 July 2019, Paris, France.
473. HAEUSSLER A., CHUAYBOON S., ABANADES S., Solar redox cycling of ceria in a monolithic reactor for two-step H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> splitting: isothermal methane-induced reduction versus temperature-swing cycle, 25th SolarPACES Conference, SolarPACES 2019, Solar Power & Chemical Energy Systems, October 1-4, 2019, Daegu, South Korea.
474. KIMURA H., ABANADES S., SEO S., Production of C<sub>2</sub>-olefins and hydrogen from methane pyrolysis with concentrated solar energy, 25th SolarPACES Conference, SolarPACES 2019, Solar Power & Chemical Energy Systems, October 1-4, 2019, Daegu, South Korea.
475. NGOUE D., CARLING-PLAZA A., DIOP A., GROSJEAN A., PARES V., SOUM-GLAUDE A., QUOIZOLA S., HERNANDEZ E., THOMAS L., Concentrated solar power plants need plasma coatings for efficient solar energy conversion, Platinium 2019, 23-27/09/19, Antibes, France, Oral
476. NGOUE D., DIOP A., CARLING-PLAZA A., GROSJEAN A., PARES V., SOUM-GLAUDE A., QUOIZOLA S., HERNANDEZ E., THOMAS L., Elaboration, performance and durability analysis of selective coatings for CSP, SFERA III 1st Summer School and Doctoral Colloquium, 9-13/09/2019, Odeillo-France, oral
477. OLIVES R., MANCAUX J.M., Étude d'un dispositif innovant intégré au chauffe eau solaire, Colloque International Franco-Québécois en énergie -CIFQ2019, Canada, 16-20 juin 2019.
478. OLIVES R., MANCAUX J.M., Intensification des transferts dans un stockage thermique par chaleur latente, Colloque International Franco-Québécois en énergie -CIFQ2019, Canada, 16-20 juin 2019.
479. REBOUILLAT B., FALCOZ Q., NEVEU P. 2nd law analysis of thermocline thermal storage systems. ECOS 2019, Wrocław, Poland , 23-28 June 2019.
480. REOYO-PRATS B., JOANNIS-CASSAN C., DEZANI C., GOETZ V., CALAS-BLANCHARD C., LACORTE BRUGUERA, PLANTARD G., Solar photo-oxidation process: an innovative technology to partially mineralize three major pharmaceuticals to make them biodegradable, 12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Berlin, Germany, 16-20 June, 2019
481. ROYER S., FRUCHIER O., GACHON D., TALBERT T., « Modeling of a Marina power network using Simulink - PLECS conceptual model », EPE 2019, Gênes, Italie (article accepté)
482. TELEGGANG CHECKEM C., GOETZ V., CHIRON S., PLANTARD G., Activation of persulfate for water decontamination on pilot scale solar equipment: the example of Interreg SUDOE4KET4Reuse project, 12th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Berlin, Germany, 16-20 June, 2019
483. TOLBA H., DKHILI N., NOU J., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., GHI forecasting using Gaussian process regression. IFAC Workshop on Control of Smart Grid and Renewable Energy Systems (CSGRES), Jeju, Corée du Sud, 10-12 juin 2019.

## Conférences invitées dans des congrès internationaux Invited lectures in international conferences

### 2016

- 484. AUSSEL D., "Projected solutions of Nash games with applications to electricity markets." , Conference APPOPT16 - La Havana, Cuba - 06/2016.
- 485. AUSSEL D., "Nash games defined by nonself constraint maps: when models of electricity market get closer to real bid processes.", Conference ACAO16 - Erice, Sicilia, Italy - 07/ 2016
- 486. CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., UHTCs behavior and thermal radiative properties in extreme conditions for space and energy, 6th Int. Cong. Ceramics ICC6, Dresden (Allemagne), 26 Août 2016
- 487. DOLLET A., "Research on Renewable Energy at CNRS", Keynote lecture, 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation and 2nd WasteEng Summer School, Albi, 23-26 May, 2016
- 488. GRIEU S., Concentrated Solar Power (plant) efficiency IMProvement (CSPIMP). EUREKA Innovation Week 2016, Smart Cities, Sustainable & Attractive Communities, Stockholm, Suède, 26-29 avril 2016.
- 489. MASSINES F., Plasma based aerosol processes for nanocomposite thin film deposition at atmospheric pressure", Energy Materials Nanotechnology, 12-16 Janvier 2016, HonkHong,(Chine)
- 490. VOSSIER A., DOLLET A., GUALDI F., PARENT L., AL ALAM E., AMARA M., CHEMISANA D., GUEYMARD C., "General assessment of the main limiting mechanisms in single and multi-junction solar cells" IV Congreso REDU, Quito, Equateur (2016)

### 2017

- 491. AUSSEL D., "On the use of non cooperative game theory for the analysis of energy market: from theory to computation", Conference ` ` AMASES 2017" - Cagliari, Italie - 09/2017.
- 492. BALAT-PICHELIN M., Advanced high temperature materials for space and energy applications, 1st Transpyr. Encounter Advanced Materials, TEAM-1, Sète (France), 4-6 Juillet 2017
- 493. MASSINES F., LELIEVRE J-F., "Atmospheric pressure PECVD for solar energy conversion", CIP-MIATEC", Nice (2017)
- 494. MAZET N. An overview of the research on thermal storage by sorption processes in France. IEA ECES Annex 30, TES days, Pau, 18-19/10/2017

### 2018

- 495. BALAT-PICHELIN M., High temperature ceramic materials for space applications, 14th International Ceramic Congress, CIMTEC, Pérouse (Italie), 4-8 juin 2018
- 496. BALAT-PICHELIN M., Oxidation and emissivity of refractory metals and alloys in severe space environment (very high temperature, high vacuum, air plasma), 10th Int. Conf. Process. Manuf. Adv. Mater. THERMEC' 2018, Paris (France), 9-13 juil. 2018
- 497. CALIOT C., Challenges of high-temperature volumetric receivers in CSP. The Decarbonisation of the Energy Sector in the Mediterranean Region and Middle East – The Role of CSP. Nicosia, Cyprus, 29 Nov.-1 Dec. 2018.
- 498. GRIEU S., Intrahour forecasting of DNI to the management of CSP plants. 4th International Conference on Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP) 2018, Perpignan, France, 27-29 juin 2018.
- 499. GRIEU S., Towards the intrahour forecasting of direct normal irradiance using sky-imaging data. France-Japan Joint Forum on Solar Energy, Perpignan, France, 8-9 octobre 2018.
- 500. MASSINES F., Exploring new plasma regime, Discussion leader, GRC 2018 Gordon Research Conference Plasmas Processing Science, Bryant University, 5-10 août 2018, (USA)
- 501. VOSSIER A., ZEITOUNY J., KATZ E.A., DOLLET A., FLAMANT G., GORDON J.M., "Performance bounds for hybrid solar photovoltaic/thermal electricity generation strategies" 21st Sede Boqer Symposium on Solar Electricity Production (2018)

### 2019

- 502. BALAT-PICHELIN M., RAPAUD O., PIRIOU C., PELLEGRINI C., Oxidation in air plasma of ZrB<sub>2</sub> and HfB<sub>2</sub>-SiC based composites from 1800 to 2200 K, 10th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composite, HTCMC-10, Bordeaux (France), 23-26 Sept. 2019
- 503. MASSINES F., MAGNAN R., HAGELAAR G., "Multi-frequency atmospheric pressure plasma for surface treatment", XXXIV ICPIG, 14-19 juillet 2019, Sapporo (Japon)
- 504. MASSINES F., MAGNAN R., HAGELAAR G., "Dual frequency DBDs or how to design an atmospheric pressure plasma for surface treatment", ISPC 24, International Symposium on Plasma Chemistry, 9-14 June 2019, Napoli (Italy)

## Conférences invitées dans des séminaires, workshops ou congrès nationaux Invited lectures in workshops or national conferences

### 2016

505. AUSSEL D., "Multi-leader-follower-games: a state of art of their (global vs local) reformulations", Conference COPI'16 - EdF'Lab, Saclay - Novembre 2016.
506. AUSSEL D., "Nonsmooth quasiconvex optimization: from subdifferential to limiting normal operator.", Workshop "A Day on Recent Advances on Optimization" - Messina, Sicilia, Italy - July 2016
507. AUSSEL D., "Recent advances on Quasi-Variational Inequalities/Generalized Nash Equilibrium Problems.", Annual days of the GdR MOA - Guadeloupe - Novembre 2016.
508. AUSSEL D., Workshop "On Nash games and quasivariational inequalities defined by non-self constraint maps.", on Non-smooth and Stochastic Optimization with Applications to Energy Management- Berlin - May 2016.
509. AUSSEL D., "Limiting Normal Operator in Quasiconvex Analysis.", Annual meeting of the Mongolian Society of Mathematics- Ulaanbaatar, Mongolia - May 2016.
510. CALIOT C., Influence des transferts radiatifs dans les récepteurs solaires à haute température. Séminaire du LTEN, Nantes, 19 avril 2016.
511. CALIOT C., S. MEY, G. FLAMANT. Etude du rendement thermique d'un absorbeur solaire haute température en mousse de SiC. Journées d'Etude SFT et FIC. Réactions, échanges et stockage dans les mousses solides : Modèles et caractérisations expérimentales. Paris, mars, 2016.
512. LECOMTE P., BLAIRON S., BOLDO D., TAILLADE F., CAUSSANEL M., BEAUVOIS G., DUVAL H., Mesure Haute Température en Environnement Irradié par Fibre Optique Utilisant l'Effet Raman. FMR 2016, 7èmes journées sur les Fibres Optiques en Milieu Radiatif, Chatenay-Malabry, France, pp. 9, 12-13 décembre 2016.
513. MAZET N., MAURAN S., STITOU D., AUSSEL D. Procédés thermo-chimiques et stockage thermique. Workshop FEDESOL Section Stockage, Chambéry, mars 2016
514. MEY S., CALIOT C., FLAMANT G., Validation expérimentale d'un modèle d'absorbeur volumique solaire à haute température. JEMP2016 Journées d'Etudes des Milieux Poreux, Anglet, octobre, 2016.
515. OLIVES R., DEJEAN G. PY X., SADIKI N., Cyclage à haute température de matériaux céramiques issus de la valorisation de déchets pour le stockage thermique, JNES, Perpignan, 28-30 juin 2016.
516. OLIVES R., NEVEU P., MAZA R., MANCAUX J.-M., PY X., Caractérisation de matériaux de stockage thermique par bilan entropique : analyse des irréversibilités. Congrès Société Française de Thermique, 31 mai- 6 juin 2016.
517. PY X., La chaleur dans les réseaux et le stockage de l'énergie (GP10), la question du stockage. Colloque ANCRE GT10, Paris 21 Janvier 2016.
518. REOYO-PRATS R., OLIVES R., NEVEU P., MANCAUX J.-M., PY X., Caractérisation de matériaux de stockage thermique par bilan entropique : analyse des irréversibilités. JNES, Perpignan, 28-30 juin 2016..
519. STITOU D., Convertisseur d'énergie thermique (chaleur/froid - chaleur/électricité) pour l'habitat , Workshop FEDESOL Section Batiments Solaires, Ines, Chambéry 30/11 au 01/12/2016 (2016)
520. VERNAY F., R. BASTARDIS, KACHKACHI H., Surface effects on FMR in magnetic nanocubes, Nonlinear Nanophotonics meets Nanomagnetism, Le Mans, Septembre 2016

### 2017

521. AAUSSEL D., "On a more suitable mathematical formulation of electricity market model.", Workshop "Variational Analysis and Equilibrium Models in Physical and Social-Economic Phenomena" - Napoli, Italie - June 2017.
522. AUSSEL D., "Reproducible sets: when Generalized Nash Equilibrium Problems can be view as Nash Equilibrium Problems.", Workshop "Mathematical Optimization in the Decision Support Systems for Efficient and Robust Energy Networks" - Modena, Italie - March 2017
523. BEAUVOIS G., CAUSSANEL M., LUPI J.-F., UDE M., TRZESIEN S., DUSSARDIER B., DUVAL H., GRIEU S., BLANC W., Caractérisation de fibres optiques sous irradiation gamma : influence du thulium, de l'aluminium, du lanthane et du cerium. Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG) 2017, Limoges, France, pp. 242-244, 4-6 juillet 2017.
524. BLANCO S., M. EL HAFI, R. FOURNIER, CALIOT C., Monte Carlo et transfert radiatif en géométrie complexe : comment penser le couplage avec les autres modes de transferts, Journées d'Etudes SFT « Méthodes numériques pour la résolution de l'équation de transfert radiatif : développements récents, modèles et objectifs », Espace Hamelin, Paris, novembre, 2017.
525. CALIOT C., BLANCO S., COUSTET C., EL HAFI M., EYMET V., FOREST V., FOURNIER R., PIAUD B., Résolution des transferts conducto-radiatifs par la méthode de Monte-Carlo en milieux poreux. Congrès Français de Thermique, Marseilles, 2017.
526. CALIOT C., Influence des transferts radiatifs dans les récepteurs solaires à haute température. Séminaire au laboratoire CETHIL, Lyon, INSA, 2017.
527. CALIOT C., Influence des transferts radiatifs dans les récepteurs solaires à haute température. Séminaire au laboratoire LAMPS, Perpignan, UPVD, 2017.
528. CALIOT C., S. BLANCO, C. COUSTET, V. EYMET, V. FOREST, R. FOURNIER, M. EL HAFI, B. PIAUD. Résolution des transferts conducto-radiatifs par la méthode de Monte Carlo en milieux poreux. JERT2017 Journées d'Etudes SFT en Rayonnement Thermique, CNRS-CEMHTI, Orléans, novembre, 2017.
529. DUPUY D., TOUTANT A. AND BATAILLE F., A priori tests of large eddy simulation models for low Mach number very anisothermal turbulent flows, Séminaire TrioCFD, Saclay, France, 20 juin 2017.
530. FERRIERE A., Present status and needs and gaps for Concentrated Solar Power, Conference de l'Institut Coriolis, Ecole Polytechnique, 23 janvier 2017

531. FRUCHIER O. AND EGEA P., «Valorisation énergétique d'un local informatique par free cooling», Journées Réseaux de l'Enseignement et de la Recherche (JRES2017), Nantes, France, 2017
532. FRUCHIER O., EGEA P., TALBERT T. AND GACHON D., «Mise en place d'un système de rafraîchissement d'un local informatique par ventilation hybride», Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Le Mans, France, 2017
533. GRIEU S., Prévision infra-horaire de l'éclairement normal direct pour la gestion des centrales CSP. Journées Nationales sur l'Energie Solaire (JNES), Perpignan, France, 13-15 juin 2017.
534. LOPEZ FERBER N., GOETZ V., FALCOZ Q., PHAM-MINH D., NZIHOU A., HOFFMANN J.F., MEFFRE A., Pilote de stockage sensible air/céramique: essais de charge, JNES, Perpignan, 13-15 Juin 2017.
535. LOPEZ-FERBER N., PHAM-MINH D., NZIHOU A., GOETZ V., FALCOZ Q., MEFFRE A., Céramiques de stockage thermique issues de mâchefer d'incinérateur. JNES, Perpignan, 13-15 Juin 2017.
536. MEY-CLOUTIER S., OLIVES R., MANCAUX J.M., Études en régime dynamique de matériaux de stockage thermique par bilans d'énergie et d'entropie. Congrès de la Société Française de Thermique, Marseille 30 mai-02 juin 2017
537. OLIVES R., Stockage d'énergie thermique dans les centrales électrosolaires, Forum Liege Creative, Liège, 2017.
538. PY X., Avancées et enjeux du domaine du stockage thermique, Matériaux pour le stockage de l'énergie - Journée Technologique, Pôles DERBI et Madeeli, Institut Carnot Chimie Balard Cirimat, Toulouse, 19 septembre 2017.
539. TALBERT T., FRUCHIER O. AND THIERY F., «Retour sur 5 ans d'apprentissage par résolutions de problèmes et par projet», Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Le Mans, France, 2017
540. THIERY F., DUVAL H., DUVERGER E. AND TALBERT T., «Gestion optimale d'un suiveur solaire», Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Le Mans, France, 2017

## 2018

541. CALIOT C., Combined conductive-radiative heat transfer analysis in complex geometry using the Monte Carlo method. Séminaire du LMAP, UPPA, Pau, mai, 2018.
542. CALIOT C., Influence de la géométrie sur les transferts couplés dans un récepteur volumique solaire à haute température. Journées Nationales de l'Energie Solaire, JNES, Villeurbanne, 2018.
543. CALIOT C., J.-J. BEZIAN, S. BLANCO, C. COUSTET, V. EYMET, V. FOREST, R. FOURNIER, M. EL HAFI, B. PIAUD, B. GRANGE, G. FLAMANT, Design des systèmes à concentration par le logiciel SOLSTICE, Journées Nationales de l'Energie Solaire, JNES2018, Villeurbanne, juin, 2018.
544. CALIOT C., Transferts couplés dans un récepteur volumique solaire à haute température. Journées d'Etudes SFT « Numérique et couplage thermique », Espace Hamelin, Paris, mars, 2018.
545. COURTY M.-A., CONESA M. Approche interdisciplinaire de l'impact de l'électricité atmosphérique naturelle sur les populations et l'environnement. XVIIe FORUM de l'Association Protection Foudre , Mardi 20 novembre 2018,
546. COURTY M.-A. et CONESA M. Le GIEAN : une interdisciplinarité extrême aux confins des savoirs et des pratiques scientifiques, Colloque MSH Montpellier, 20-21
547. COURTY M.-A., ANDRE, P., HAMDAN, A., MARTINEZ J.-M. et MASSINES F. NANOCOMPOSITES POLYMERES-METAUX SYNTHETISES PAR L'ACTIVITE ELECTRIQUE NATURELLE. Atelier Polymères et Océan, Montpellier 15-17 janvier 2018
548. FALCOZ Q., FASQUELLE T., NEVEU P., Dynamic integration of thermocline energy storage in concentrated solar power plants, Congrès de la Société Française de Thermique, Pau, 29 mai - 1 juin 2018.
549. GOETZ V. ; PLANTARD G., Solar Advanced Oxidation for Water Treatment, France-Japan Join Forum on Solar Energy, UPVD France, 8-9 Octobre 2018.
550. GOETZ V., PLANTARD G., CHIRON S., Photo-procédés d'oxydation avancée par voie solaire pour le traitement de l'eau, JNES, Lyon 27-29 Juin 2018.
551. MANCAUX J.M., OLIVES R., Dispositif innovant de production d'eau chaude solaire destiné à l'habitat individuel et collectif. Congrès de la Société Française de Thermique, Pau 29 mai-01 juin 2018
552. MAZET N. Réacteurs solide/gaz pour procédés à sorption. Atelier SFT 2018 'Modélisation des systèmes à sorption: Approches croisées énergétique / génie des procédés', 31 Mai 2018, Pau
553. MAZET N. Recherches sur le stockage thermique par procédés à sorption. Atelier SFT 2018. 'La recherche sur le stockage thermique de l'énergie en France'. 30 Mai 2018, Pau
554. OLIVES R., ESPARGILLIERE H., MANCAUX J.M., Mesure des irréversibilités d'un stockage thermique par chaleur latente durant les cycles de charge et de décharge. Congrès de la Société Française de Thermique Pau 29 mai-01juin 2018
555. OLIVES R., ESPARGILLIERE H., MANCAUX J.M., Caractérisation de matériaux de stockage thermique : Analyse de l'effusivité. COFFRET 2018 Strasbourg 28-29juin 2018
556. OLIVES R., Thermal energy storage for concentrated solar power plants, 14ième JEMP, Nantes 8-10 Octobre 2018.
557. RIBEIRO E., GOETZ V., TEYSSANDIER F., PLANTARD G., Elaboration originale par mécanosynthèse de composites sorbant-photocatalyseur : applications au traitement tertiaire des biocalcitrants, Matériaux 2018, Strasbourg 19-23 Novembre 2018.
558. TALBERT T., « Managing PV power plant : a case study », International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing, 27-29 juin, Perpignan, 2018.
559. TOUTANT A. , Simulation numérique d'écoulements fortement anisothermes et/ou diphasiques, Congrès SFT, Pau, France, 2018.

## 2019

560. MAZET N., GODEFROY A., MAURAN S., PERIER-MUZET M. Cycles à sorption hybrides : stockage thermique & conversion électricité/froid, Workshop FEDESOL, Axes 'Bâtiments et villes solaires' & 'Stockage et gestion de l'intermittence', Lyon, 3-4 octobre 2019

## Ouvrages ou Chapitres d'ouvrage

### Books or book chapters

#### 2016

561. BALAT-PICHELIN M., Experimental evaluation of oxidation laws and emissivity in atmospheric entry conditions to study the survivability of space debris, Lecture Series « Space debris reentry and mitigation », STO-AVT-262, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genèse (B), Eds. T. Magin, A. Turchi, J.M. Muylaert, 12-15 September 2016 (32 p.)
562. MATHIEU B., AULERY F., TOUTANT A., FAUCHET G. AND BATAILLE F., Specific turbulent kinetic energy transfer in very anisothermal flow, High Performance Computing in Science and Engineering – Garching/Munich, S. Wagner, A. Bode, H. Satzger and M. Brehm editors, 2016.
563. ROUSSEAU B., GUEVELOU S., VICENTE J., CALIOT C., FLAMANT G., Tuning the spectral selectivity of SiC-based volumetric solar receivers with ultra-high temperature ceramic coatings, in « Ceramics for Energy, Conversion, Storage, and Distribution Systems », Ceramic Transactions, 255, Volume Editors Mrityunjay Singh, Taksuki Ohji, Alexander Michaelis, 2016
564. ROUX V. en collaboration avec COURTY M.-A., Des céramiques et des hommes. Décoder les assemblages archéologiques. 2016, Paris: Presses Universitaires de Paris Ouest.
565. SCHMOOL D.S., KACHKACHI H., Chapter One- « Collective Effects in Assemblies of Magnetic Nanoparticles », Solid State Physics 67, 1-101 (2016)

#### 2017

566. AUSSEL D., Chapitre "On single-valuedness of quasimonotone set-valued operators" dans le livre « Generalized Nash Equilibrium Problems, Bilevel Programming and MPEC », Contributed Volume, Springer, Berlin (à paraître), p. 97-119., ISBN 9789811047749
567. COURTY M.-A., Ch. 11 : Mémoires environnementale et culturelle des sols. In Les sols au cœur de la zone critique : fonctions et services (Dir. J. Berthelin, C.& J.-C. Munch, ISTE Science Pub. LTD, 2017
568. PICORNELL-GELABERT, L. ALLUE E., and COURTY M.-A., An archaeology of fuels: Social and environmental factors in behavioural strategies of multi-resource management. Quaternary International, 2017 (431) : 2-5.
569. PY X., SADIKI N., OLIVES R., GOETZ V., FALCOZ Q. Thermal energy storage for CSP (Concentrating Solar Power) EPJ Web of Conferences 148, 00014, DOI:10.1051/epjconf/201714800014, 2017.
570. SOUM-GLAUDE A., DI GIACOMO L., QUOIZOLA S., THOMAS L., FLAMANT G., Selective surfaces for solar thermal energy conversion: from multilayers to nanocomposites. (20 pages) for the book Nanotechnology for energy sustainability, 1 Energy Production, Editors Raj B, Van de Voorde M and Mahajan Y, Wiley-VCH Verlag GmbH, ISBN 978-3-527-34014-9, 2017

#### 2018

571. BALAT-PICHELIN M., Céramiques ultra-réfractaires, Techniques de l'Ingénieur, N 4810 v1, 10 Sept. 2018 (17 p.)
572. COURTY M.-A. Environmental and Societal Memories of Soils. J. Berthelin, C. Valentin and J.-C. Munch (eds.), Soils as a Key Component of the Critical Zone 1: Functions and Services, Volume 1, Ch. 11. Wiley ISTE Ltd 2018
573. COURTY M.A. Mémoires Environnementales et Sociétales des Sols. J. Berthelin, C. Valentin et J.-C. Munch (eds.). Volume 1, Les sols au coeur de la zone critique 1. Fonctions et services. ISTE Science Pub. LTD
574. FEDOROFF N., COURTY M.-A. M.-A. and GUO Z.T. Palaeosoils and Relict Soils. In Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths, G. Stoops, V. Marcellino & F. Meers (eds), Interpretation of micromorphological features of Soils and Regoliths. Elsevier, 821-862.
575. MEUNIER F., NEVEU P. Convertisseurs thermiques : Machines frigorifiques, Pompes à chaleur, thermotransformateurs, BE 9 773, Ed. Techniques de L'Ingénieur, 10 juin 2018, France.

#### 2019

576. BALAT-PICHELIN M., ECeS Summer School Torino (Italy), 14 et 15 juin 2019 - Design, characteristics and applications of Ultra-High Temperature Ceramics (29 slides) - Study of the high temperature oxidation of Ultra-High Temperature Ceramics and measurement of emissivity and catalycity (space and energy fields) (56 slides)
577. NGOUE D., GROSJEAN A., DI GIACOMO L., QUOIZOLA S., SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., Part A "High temperature air-stable metal/ceramic solar selective absorber multilayer coatings based on silicon carbide", chapter "Ceramics for CSP applications, from thermophysical properties to solar absorbers", for the book "Advanced Ceramics for Energy Conversion and Storage", Editors B Lee and O Guillon (to be published in 2019)
578. ROUX V., COURTY M.A., Ceramics and Society. A technological approach to archaeological assemblage. Springer.

## Conférences internationales et nationales sans actes Conferences without proceedings

2016

579. AVELLANEDA J.-M., A. TOUTANT, F. BATAILLE, Influence des conditions aux limites thermiques sur les statistiques d'écoulements turbulents dans les récepteurs solaires, Journée Matériaux et Fluides à Haute Température, Paris, 20 septembre 2016
580. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., ANNALORO J., OMALY P., Atmospheric entry of space debris: oxidation and emissivity data for model implementation, Groupe de synthèse sur les débris spatiaux, CNES, Toulouse (France), 28 juin 2016
581. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., ANNALORO J., Oxidation and emissivity of space debris materials (ceramic and metallic alloys) during their atmospheric entry, High Temperature Materials Chemistry HTMC 15, Orléans (France), 29 mars-1 avril 2016
582. BALAT-PICHELIN M., Energie solaire concentrée pour l'étude des matériaux en environnement spatial à haute température : projets Solar Probe Plus (SPP, NASA) et véhicule IXV (ESA), Séminaire conjoint des GdR SAM "Solidification des alliages métalliques" et ThematHT "Thermodynamique des matériaux à haute température", Odeillo (France), 2-4 mai 2016.
583. BEAUVOIS G., CAUSSANEL M., LUPI J.-F., UDE M., TRZESIEN S., DUSSARDIER B., DUVAL H., GRIEU S. Projet DROÏD : Développement d'un dosimètre distribué à fibre optique. 7e Journées sur les Fibres Optiques en Milieu Radiatifs (FMR 2016), Chatenay-Malabry, France, 12-13 décembre 2016.
584. BECHE E., BALAT-PICHELIN M., FLAUD V., ESVAN J., PERARNAU D., SCITI D., ALFANO D., Etude microstructurale de composés ZrB<sub>2</sub>-SiC fibre UHTC traités à hautes températures par voie solaire, 7ème Conf. Fr. Spectros. Electron. ELSPEC 2016, Meudon (France), 22-27 mai 2016
585. BECHE E., FLAUD V., ESVAN J., BALAT-PICHELIN M., SCITI D., ALFANO D., Investigations by XPS, AES, XRD and SEM of UHTC materials heated by solar energy, ETXPS 2016, 2nd Workshop "XPS analysis", Roscoff, (France), September 26-30, 2016.
586. BELLEC M., TOUTANT A., FOUCAUT J.M. AND OLALDE G., Détermination de la contrainte de cisaillement pariétale dans un écoulement de canal plan représentatif d'un récepteur solaire, Journées nationales sur l'énergie solaire (JNES), Perpignan, France, June 28-30, 2016.
587. BELOT M., VINAY G., TOUTANT A. AND FALCOZ Q., Etude des transferts thermiques au sein d'un lit de particules contenant un matériau à changement de phase pour le stockage de chaleur, Journées nationales sur l'énergie solaire (JNES), Perpignan, France, June 28-30, 2016.
588. CALIOT C., Dimensionnement de centrales solaires. Séminaire de formation CSP, Ouarzazate, Maroc, 25-28 mai, 2016.
589. CALIOT C., Heliostat field optimization techniques, SFERA2 Training Course for CSP Professionals: Central receivers: Operation of heliostat fields. 13-17 June 2016, PROMES-CNRS, Odeillo, France
590. CALIOT C., Introduction : le solaire thermique à concentration. Séminaire de formation CSP, Ouarzazate, Maroc, 25-28 mai, 2016.
591. CALIOT C., M. COQUAND, F. HENAULT. Backward-gazing method for measuring heliostat shape errors. in Light, Energy and Environment, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2016), paper SoM3C.2.
592. CALIOT C., Optical modelling in CSP. NESTER School, EU project NESTER, Nicosia, Cyprus, November, 2016.
593. CALIOT C., Optics modelling in CSP, SFERA2 Training Course for CSP Professionals: Central receivers: Operation of heliostat fields. 13-17 June 2016, PROMES-CNRS, Odeillo, France
594. CALIOT C., Parabolic Troughs. NESTER School, EU project NESTER, Nicosia, Cyprus, November, 2016.
595. CALIOT C., Review of solar receiver technologies, SFERA2 Training Course for CSP Professionals: Central receivers: Operation of heliostat fields. 13-17 June 2016, PROMES-CNRS, Odeillo, France
596. CALIOT C., Solutions d'hybridation pour les centrales solaires. Séminaire de formation CSP, Ouarzazate, Maroc, 25-28 mai, 2016.
597. CALIOT C., Technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques. Séminaire de formation CSP, Ouarzazate, Maroc, 25-28 mai, 2016.
598. CARDINAUD C, GAZAL Y, GOULLET A, HAMON J, PLUJAT B, QUOIZOLA S, THOMAS L, BACHAR A, BOUSQUET A, TOMASELLA E, BELMAHI M, HUGON R, THOUVENIN A, Croissance de couches minces SiC<sub>x</sub>NyHz: des interactions plasma / surface aux propriétés, 13ème Journées du Réseau Plasmas Froids, La Rochelle, France, 17-20 octobre 2016, Poster
599. CAUSSANEL M., DUVAL H., BEAUVOIS G., GILARD O., Characterization, modeling and data storage of radiation-induced attenuation within optical fibers. Séminaire CNES "Fibre optique et instrumentation", Toulouse, France, 4 février 2016.
600. CHARPENTIER L., PONS M., BALAT-PICHELIN M., Ageing of HT-CVD AlN exposed to concentrated solar energy in air, High Temperature Materials Chemistry HTMC 15, Orléans (France), 29 mars-1 avril 2016
601. CHARPENTIER L., SILVESTRONI L., SANS J.L., SCITI D., BALAT-PICHELIN M., Ultra-High Temperature Ceramics in extreme environment, High Temperature Materials Chemistry HTMC 15, Orléans (France), 29 mars-1 avril 2016
602. COQUAND M., CALIOT C., HENAULT F., Backward-gazing method for measuring heliostat shape errors. in Light, Energy and Environment, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2016), paper SoM3C.2.
603. CURE J., PIETTRE K., COPPEL Y., BECHE E., ESVAN J., COLLIERE V., CHAUDRET B., FAU P., Solution Layer Deposition Solution Layer Deposition: A liquid ALD technique to graft metal oxide layers on Silica substrate, 6th EuCheMS, Seville, (Spain), September 11-15th, 2016.
604. DUPUY D., N. EL GHARBI, A. TOUTANT, F. BATAILLE, Energie cinétique et transfert de chaleur au sein des récepteurs solaires, Congrès Français de Thermique, 8 p., Toulouse, mai 2016
605. DUVERGER E., PENIN C., ALEXANDRE P., THIERY F., GACHON D. AND TALBERT T., «Prévision solaire pour la gestion énergétique des microgrids», Journées Nationales sur l'Energie Solaire (JNES 2016), Perpignan, France, 2016
606. DUVERGER E., PENIN C., ALEXANDRE P., THIERY F., GACHON D. AND TALBERT T., «De la centrale photovoltaïque aux microgrids», Journées Nationales du Photovoltaïque (JNPV 2016), Dourdan, France, 2016
607. FERRIERE A., Measurement of concentrated solar flux, SFERA II Training Course, June 2016
608. GROSJEAN A, SOUM-GLAUDE A, THOMAS L, NEVEU P, Etude des couches minces pour l'énergie solaire concentrée en fonction de différents spectres solaire - Journées Nationales de L'Energie Solaire (JNES), Perpignan, France, 28-30 juin 2016, Poster.

609. LECOMTE P., BLAIRON S., BOLDO D., TAILLADE F., CAUSSANEL M., BEAUVOIS G., DUVAL H., Mesure Haute Température en Environnement Irradié par Fibre Optique Utilisant l'Effet Raman. 7e Journées sur les Fibres Optiques en Milieu Radiatifs (FMR 2016), Chatenay-Malabry, France, 12-13 décembre 2016.
610. LERAY C., TOUTANT A., FERRIERE A. AND OLALDE G., Analyse numérique et expérimentation d'un absorbeur solaire céramique haute température, Journées nationales sur l'énergie solaire (JNES), Perpignan, France, June 28-30, 2016.
611. MAZET N., MAURAN S., STITOU D., KURT E., HERNANDEZ G., MICHEL B. Matériaux et reacteurs thermo-chimiques pour le stockage d'énergie thermique. JNES 2016. 28/30 Juin 2016, Perpignan, France, Communication orale
612. MEY S., CALIOT C., G. FLAMANT. Validation expérimentale d'un modèle d'absorbeur volumique solaire à haute température. JEMP2016 Journées d'Etudes des Milieux Poreux, Anglet, octobre, 2016.
613. NADAL E., BARROS N., GLENAT H., LAVERDANT J., SCHMOOL D.S., KACHKACHI H., Photo-induced in-situ formation of gold nanoparticle gratings in polymer thin with an interference pattern in the visible range, MNO 2016, International Workshop on Metallic Nano-Objects), Lyon, 2016
614. OLIVA A., FALCOZ Q., CALVET N., Analyse théorique et expérimentale d'un procédé solaire innovant : le sablier solaire, Journées nationales sur l'énergie solaire, 2016, Perpignan, France.
615. OLIVES R., DEJEAN G. PY X., SADIKI N., High temperature thermal cycling of recycled ceramics used as thermal energy storage material, Int. Conf. on High Temp. Mat. HTMC15, Orléans, France, March 2016.
616. PIRIOU C., RAPAUD O., CHARPENTIER L., FOUCAUD S., Study of the sintering and oxidation behavior to the HfB<sub>2</sub>/SiC system. Synthesis, reactivity and chemical-physical characterization, 7th International Workshop on Advanced Ceramics (IWAC 07), Limoges (France), 26-28 sept. 2016
617. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., Solar carbothermal reduction at low pressure: a new route to produce metallic fuels, High Temperature Materials Chemistry HTMC 15, Orléans (France), 29 mars-1 avril 2016
618. STITOU D., MAZET N., MAURAN S., BOULNOIS G., "Stockage Thermo-chimique pour centrales thermodynamiques", JNES 2016. 28/30 Juin 2016, Perpignan, France., Communication orale
619. TALBERT T., GACHON D., FRUCHIER O., THIERY F. AND MARTIRE T., «Architecture électrique pour systèmes CPV», Journées Nationales du Photovoltaïque (JNPV2016), Dourdan, France, 2016
620. THOUVENIN A, AHMAD A, PLUJAT B, HUGON R, BRIANÇON J-L, THOMAS L, MALLET M, BELMAHI M, Etude de films minces de SiCN:H déposés par PVD et par PE-CVD micro-onde avec deux précurseurs organosiliciés, 14ème congrès de la Société Française de Physique - Division Plasmas, Nancy, France, 7-9 juin 2016, Oral

## 2017

621. ANDRE L., ABANADES S., CASSAYRE L., Stockage thermo-chimique de l'énergie solaire : apport des modèles thermodynamiques pour la compréhension des propriétés des oxydes mixtes, 4ème Journées annuelles du GdR TherMatHT, Limoges (France), 26-27 jan. 2017
622. BECHE E., (conférencier invité), L'ESCA : Application à l'étude de l'oxydation des matériaux, Workshop sur les techniques d'analyses de surface, Montpellier, 22 juin 2017
623. BECHE E., FLAUD V., ESVAN J., GORAND Y., PERARNAU D., Cinétiques d'oxydation de matériaux hautes températures (UHTC) à base de ZrB<sub>2</sub> et SiC, traités par voie solaire : Etude microstructurale multi-échelle, Journées Scientifiques du Comité Spectroscopies d'Electrons (JSE), Paris, France, 17-18 mai 2017
624. BECHE E., FLAUD V., ESVAN J., GORAND Y., PERARNAU D., Investigation by XPS, XRD, AES and Raman spectroscopy of cavities of porous ceramic materials, ECASIA 2017 (European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, Montpellier, France, september 24-29th, 2017
625. BELOT M., VINAY G., TOUTANT A. AND FALCOZ Q., Etude des transferts thermiques par convection naturelle au sein d'une particule sphérique à changement de phase, Congrès Français de Mécanique (CFM), Lille, France, August 28-September 1st, 2017.
626. CALIOT C., Parabolic troughs. Concentrating Solar Thermal Technologies, One week introductory course, STAGE-STE EU project, Sevilla, Spain, October 2017.
627. CALIOT C., Parabolic Troughs. NESTER School, EU project NESTER, Nicosia, Cyprus, November, 2017.
628. CALIOT C., S. BLANCO, C. COUSTET, M. EL HAFI, V. EYMET, V. FOREST, R. FOURNIER, B. PIAUD, Résolution des transferts conducto-radiatifs par la méthode de Monte-Carlo en milieux poreux. Congrès Français de Thermique, Marseilles, 2017.
629. CARDINAUD C, THIRY D, GAZAL Y, CHAUVIN A, EL MEL A, PLUJAT B, TESSIER P-Y, GOULLET A, THOMAS L, Caractérisation de couches ultra-minces ou nanostructurées par l'analyse du fond de diffusion inélastique en XPS, Journées de spectrométrie d'électrons, Paris - France, 17-18 Mai 2017
630. CHARPENTIER L., Oxidation of high temperature ceramics, NESTER Workshop, Odeillo (France), 12-13 oct. 2017
631. COLAS J., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., PONS M., MERCIER F., CHEN D., PIQUE D., Etude du comportement à haute température de matériaux multicouches pour récepteurs solaires, Journées Nationales sur l'Energie Solaire JNES, Perpignan (France), 13-15 juin 2017
632. COURTY M.-A., BRUNET P., MILANIAK N., HAMDAN A., BELMONTE T., MARTINEZ J.-M., MASSINES F. & BROITMAN E., Propriétés remarquables de nano-composites naturels synthétisés dans l'atmosphère sous l'action de décharges électriques: apports des expérimentations en laboratoire. Réunion annuel du GDRI NMC, Montréal, Canada, 12-14 juin 2017.
633. DU CLUZEAU A., BOIS G., TOUTANT A. AND MARTINEZ J.-M., Surface tension energy in bubbly flows: physical impact and modelling in RANS Eulerian-Eulerian two fluid model. Workshop Traitement de données pour la Mécanique des Fluides, Paris, France, November 29-December 1st, 2017.
634. DUPUY D., TOUTANT A. AND BATAILLE F., Étude de l'équation d'énergie pour le développement de modèles sous-maillages adaptés aux écoulements fortement anisothermes, Congrès SFT, Marseille, France, June 30-May 2nd, 2017.
635. FRUCHIER O. AND EGEE P., «Valorisation énergétique d'un local informatique par free cooling», Journées Réseaux de l'Enseignement et de la Recherche (JRES2017), Nantes, France, 2017

636. FRUCHIER O., EGEA P., TALBERT T. AND GACHON D., « Mise en place d'un système de rafraîchissement d'un local informatique par ventilation hybride », Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Le Mans, France, 2017
637. GROSJEAN A, SOUM-GLAUDE A, THOMAS L, NEVEU P, Study, modeling and optimisation of solar surfaces for concentrated solar collectors.- SolLab, Berlin, Allemagne, 15-17 mai 2017, Oral
638. GROSJEAN A., VOSSIER A., SOUM-GLAUDE A., THOMAS L., NEVEU P., Impact des conditions météorologiques locales pour la conversion de l'énergie solaire, Journées Nationales sur l'Énergie Solaire (JNES 2017), Perpignan, France, 13 - 15 June 2017, Poster.
639. KACHKACHI H., Intrinsic versus collective effects in arrays of nanomagnets: To what extent the properties of nano-objects are preserved in an assembly?, Invité par MONARIS-Consortium Européen, Paris, 30 March 2017
640. LACROIX C., PERIER-MUZET M., STITOU D., "Dessalement par Procédé thermo-hydraulique solaire", JNES 2017.13/15 Juin 2017, Perpignan, France. Poster
641. LEMAIRE A., PERONA A., CAUSSANEL A., DOLLET A., La "durée de vie" des électrons: un paramètre clef pour l'optimisation des cellules photovoltaïques (PV), UPVD doctoral congress, Perpignan, France, 2017, Poster
642. LEMAIRE A., PERONA A., CAUSSANEL M., DOLLET A., Design Optimization of CPV Solar Cells based on AlGaAsSb through Lifetime measurement by Open Circuit Voltage Decay. 13th SOLLAB Doctoral Colloquium on Solar Concentrating Technologies, Berlin, Germany, May 15-17, 2017.
643. LEMAIRE A., PERONA A., CAUSSANEL M., DOLLET A., Design optimization of CPV solar cells based on AlGaAsSb through lifetime measurement by open circuit voltage decay. Journées Nationales sur l'Energie Solaire (JNES), Perpignan, France, 13-15 juin 2017.
644. MASSINES F., Elaboration de couches minces nanocomposites par plasmas froids à la pression atmosphérique, 4eme atelier du GDRI NMC (Groupement de recherche International Nanomatériaux Multifonctionnels Contrôlés) nanomatériaux multidonctionnels contrôlés, Montréal, juin 2017.
645. MAZET N., BOULNOIS G., KURTZ E., STITOU D., MAURAN S. Stockage thermique haute température par procédé thermo-chimique. SFGP2017. Récents Progrès en Génie des Procédés, 110 – 2017
646. NADAL E., PERES L., BARROS N., SOULANTICA K., RESPAUD M. KACHKACHI H., In situ synthesis of plasmonic and magnetic nanocomposites under concentrated solar irradiation, ANNIC 2017 (Applied Nanoscience and nanotechnology International Conference), Rome, Italy, 2017
647. NOU J., EYNARD J., THIL S., GRIEU S., Préviation infra-horaire de l'éclairement normal direct pour la gestion des centrales CSP. Journées Nationales sur l'Energie Solaire (JNES) 2017, Perpignan, 13-15 juin 2017.
648. PIRIOU C., FOUCAUD S., RAPAUD O., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., Contribution à l'étude thermodynamique et comportement à l'oxydation de céramiques ultra-réfractaires à base de diborure d'hafnium et de carbure de silicium, Journées Annuelles du Groupe Français de la Céramique GFC, Rennes (France), 21-23 mars 2017
649. PIRIOU C., FOUCAUD S., RAPAUD O., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., Contribution to the thermodynamic study and oxidation behavior of HfB<sub>2</sub>-SiC Ultra-High Temperature Ceramics, ECerS2017 - 15th Conference & Exhibition of the European Ceramic Society, Budapest (Hongrie), 8-13 juil. 2017
650. REOYO-PRATS R., FAUGEROUX O., CLAUDET B., THIBAUT H., Vieillesse accélérée de revêtements pour récepteur de centrales solaires à concentration. Journées Nationales sur l'Energie Solaire (JNES), Perpignan, France, 13-15 juin 2017.
651. SALAS D., TAPACHÈS E., MAZET N., AUSSEL D. Utilisation d'un stockage thermo-chimique dans une centrale solaire à tour: optimisation économique globale via l'utilisation de pré-scénarios. JNES 2017, Perpignan
652. TALBERT T., FRUCHIER O. AND THIERY F., « Retour sur 5 ans d'apprentissage par résolutions de problèmes et par projet », Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Le Mans, France, 2017
653. TAPACHÈS E., PERIER-MUZET M., BOULNOIS G., MAZET N., MAURAN S. Stockage thermique pour CSP : performances de réacteurs lits fixes haute température. JNES 2017, Perpignan
654. THIERY F., DUVAL H., DUVERGER E. AND TALBERT T., « Gestion optimale d'un suiveur solaire », Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Le Mans, France, 2017
655. VERNAY F., DEJARDIN J.-L., RESPAUD M., KACHKACHI H., Effect of dipolar interaction and DC magnetic field on the SAR of an array of nanoparticles, 11th Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (HMM 2017), Barcelona, Mai 2017

## 2018

656. ARENA H., ARRACHAT G., SOUM-GLAUDE A., PRADEILLES N., JONCHÈRE A., MESBAH A., MAITRE A., DESCHANELS X., Carbures nanocomposites SiC-TiC pour des applications solaires thermodynamiques : maîtriser l'élaboration pour optimiser les propriétés, Matériaux 2018, Strasbourg, France, 19 - 23 November 2018, Oral
657. ARENA H., ARRACHAT G., SOUM-GLAUDE A., PRADEILLES N., JONCHÈRE A., MESBAH A., MAITRE A., DESCHANELS X., Élaboration et caractérisation de céramiques nanocomposites TiC-SiC pour des applications solaires photothermiques, Matériaux 2018, Strasbourg, France, 19 - 23 November 2018, Poster
658. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., ANNALORO J., Oxydation et émissivité d'alliages métalliques à très haute température : application à la problématique des débris spatiaux, Matériaux 2018, Strasbourg (France), 19-23 nov. 2018
659. BALAT-PICHELIN M., CHARPENTIER L., Oxydation et propriétés thermoradiatives d'UHTCs en conditions extrêmes (espace et énergie), Journée Réfractaires et Ultra-réfractaires, Limoges (France), 8 nov. 2018
660. BASTARDIS R., VERNAY F., KACHKACHI H., Magnetization nutation in nanomagnets: possible magneto-plasmonic coupling, 10th SpinS Workshop on Role of magnetism in energy harvesting and conversion by hybrid nanostructures (SpinS 2018), Perpignan, Octobre 2018
661. BECHE E., FLAUD V., ESVAN J., PERARNAU D., Etude des signatures XPS d'alliages Fe-Ni et Ni-Fe-Cr-Mo-Nb traités à hautes températures ELS-PEC 2018, 9ème Conférence Francophone sur les Spectroscopies d'Électrons, Biarritz, (France), 05-08 juin 2018.
662. BENZAGMOUT A., FRUCHIER O., TALBERT T., MARTIRE T., ALEXANDRE P., « Modélisation et caractérisation de signatures électriques de panneaux photovoltaïques », Journées Nationales sur l'Énergie Solaire, Villeurbanne, 27-29 Juin 2018, Villeurbanne.

663. BENZAGMOUT A., TALBERT T., FRUCHIER O., BAKALI F., THIERY F., GACHON D., EGÉA P., MARTIRE T., TALBERT T., « Réalisation d'un système de mesures IV autonome pour panneaux photovoltaïques », Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes 2018 (CETSIS 2018), Fès, Maroc, 27-29 octobre 2018.
664. BENZAGMOUT A., ZAHER A., FRUCHIER O., TALBERT T., GACHON D., MARTIRE T., « Signatures électriques de modules photovoltaïques », Symposium de génie électrique (SGE 2018), Nancy, 3-5 juillet 2018.
665. CALIOT C., A Monte Carlo method for combined heat transfer analysis in complex geometry, 2nd Workshop on Heat, Light and Wind Simulation on an Urban Scale, UPPA, Anglet, février, 2018
666. CALIOT C., Concentrating Optics and Heliostat Fields Modelling. NESTER School, EU project NESTER, Nicosia, Cyprus, November, 2018.
667. CALIOT C., Influence de la géométrie sur les transferts couplés dans un récepteur volumique solaire à haute température, Congrès Français de Thermique, Pau, 2018.
668. CALIOT C., MÉSO-STAR, S. BLANCO, R. FOURNIER, Modelling of combined heat transfer with a statistical method: Application to infrared image synthesis, 3rd Workshop on Architecture & Urban Physics, Universitat de Girona, Girona, février 2019
669. CALIOT C., Parabolic Troughs. NESTER School, EU project NESTER, Nicosia, Cyprus, November, 2018.
670. CALIOT C., Review of receiver technologies in solar tower power plants. NESTER School, EU project NESTER, Nicosia, Cyprus, November, 2018.
671. CHARPENTIER L., CALIOT C., COLAS J., Impact de l'oxydation sur la dégradation des propriétés radiatives de céramiques pour la conception de récepteurs solaires haute température, Matériaux 2018, Strasbourg (France), 19-23 nov. 2018
672. CHARPENTIER L., CALIOT C., High-temperature ageing of Si/SiC ceramics, 14th Int. Ceram. Congr. CIMTEC, Pérouse (Italie), 4-8 juin 2018
673. COLAS J., CHARPENTIER L., BALAT PICHELIN M., PONS M., MERCIER F., CHEN D., PIQUE D., Coating and oxidation effect on the thermal radiative properties of Inconel 625, FeCrAlloy and Kanthal Super ER, SolarPaces 2018, Casablanca (Maroc), 2-6 oct. 2018
674. COLAS J., CHARPENTIER L., BALAT PICHELIN M., PONS M., MERCIER F., CHEN D., PIQUE D., Materials for very high temperature solar receivers, 14th Int. Ceram. Congr. CIMTEC, Pérouse (Italie), 4-8 juin 2018
675. COLAS J., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., PONS M., MERCIER F., CHEN D., PIQUE D., Etude de la tenue à l'oxydation du Kanthal Super ER pour les récepteurs solaires très hautes températures, Matériaux 2018, Strasbourg (France), 19-23 nov. 2018
676. COURTY M.-A., ANDRE, P., HAMDAN, A., MARTINEZ J.-M. et MASSINES F. NANOCOMPOSITES POLYMERES-METAUX SYNTHETISES PAR L'ACTIVITE ELECTRIQUE NATURELLE. Atelier Polymères et Océan, Montpellier 15-17 janvier 2018
677. COURTY M.-A., HAMDAN, A., MARTINEZ J.-M. et MASSINES F. Apport des expérimentations par décharges électriques en milieu liquide aux conditions de formation des nanocomposites polymères naturels. Atelier GDRI NMC, Argelès, Mais 2018.
678. CURE J., ASSI H., COCQ K., MARIN L., FAU P., BECHE E., CHABAL Y., ESTEVE A., ROSSI C., Controlled Self-Intercalation and Grafting of High-Density Au Nanoparticles on Zinc Oxide Thin Films by Photo-Deposition, 8th International Gold Conference, Paris, France, July 15-18, 2018
679. DESALEGN G., VERNAY F., KACHKACHI H., Coupling of plasmonic nanostructures to magnetic semiconductors, 10th SpinS Workshop on Role of magnetism in energy harvesting and conversion by hybrid nanostructures (SpinS 2018), Perpignan, Octobre 2018
680. DUPUY D., TOUTANT A. AND BATAILLE F., Analyse de différents modèles de simulation des grandes échelles pour les écoulements turbulents fortement anisothermes, Congres SFT, Pau, France, 2018.
681. DUVERGER E., PENIN C., ALEXANDRE P., THIERY F., ZAHER A., GACHON D. AND TALBERT, T., « Gestion Énergétique d'un Microgrid constitué d'Ombrières Photovoltaïques », Symposium de génie électrique (SGE 2018), Nancy, 3-5 juillet 2018.
682. EGÉA P., FRUCHIER O., BAKALI F., GACHON D., "Apprendre en jouant, c'est sérieux : Initiation à la sécurité informatique des objets connectés", Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes (CETSIS2017), Fès, Maroc, 2018
683. FERRIERE A., L'autre énergie solaire, Visiatome de Cadarache (CEA), 23 mai 2018
684. HAMIDI S., TOUTANT A., BATAILLE F., FLAMANT G., Analyse de sensibilité du champ de température dans un récepteur solaire à suspension dense de particules, Congres SFT, Pau, France, 2018.
685. JOUANNAUX J., HAEUSSLER A., DROBEK M., AYRAL A., CHARMETTE C., SERVE A., CARTOIXA B., ABANADES S., JULBE A., Développement de membranes denses à base de céramiques conductrices mixtes pour la production thermo-chimique de combustible solaire, Matériaux 2018, Strasbourg (France), 19-23 nov. 2018
686. KOURDANE R., FRUCHIER O., TALBERT T., GACHON D., THIERY F., MARTIRE T., « Mise en cascade de convertisseurs DC-DC pour application solaire concentrée : Architecture de puissance », Journées Nationales sur l'Énergie Solaire, Villeurbanne, 27-29 Juin 2018, Villeurbanne.
687. KOURDANE R., TALBERT T., GACHON D., FRUCHIER O., THIERY F., PETIT M., MARTIRE T., « Modélisation de structures DC/DC hautement électro-trices pour systèmes CPV », Journées Nationales du Photovoltaïque (JNPV 2018), Dourdan, 4-7 décembre 2018.
688. LEMAIRE A., PERONA A., CAUSSANEL A., DOLLET A., Design influence on minority carriers lifetime extractions by OCVD in silicon and GaAs homojunctions. Workshop PV activities in Occitanie, LAAS-Toulouse, France, December 2018, Oral
689. LEMAIRE A., PERONA A., CAUSSANEL A., DOLLET A., Si and GaAs PV junction design influence on lifetime extractions by OCVD TCAD simulation, PV school "Physics of solar cells: from basics to nanoscience", Les Houches, France, 2018, Poster
690. MAZET N., InSTORES, Intégration d'un procédé de Stockage Thermo-chimique à un cycle de Rankine, sous Energie Solaire concentrée. Colloque ANR-ADEME 2018, Issy-les Moulineaux, 4-5 juin.
691. MILOSAN I., VARGA B., BEDO T., POP M.A., BALAT-PICHELIN M., LUCA-MOTOC D., GABOR C., STOICANESCU M., Thermal analysis on the AlSi12-SiC hybrid composites sintered using solar energy (poster), 12th European Symposium on Thermal Analysis and Calorimetry, ESTAC 12, Brasov (Roumanie), 27-30 août 2018
692. N. BARROS, H. KACHKACHI, Electron transfer from metallic nanoparticles to an adsorbed molecule under the effect of plasmonic resonance: a first step towards plasmonic photocatalysis, CECAM Workshop « Modeling metal-based nanoparticles: environment and dynamical effects », Grenoble, Décembre 2018

693. NADAL E., PERES L., BARROS N., SOULANTICA K., RESPAUD M., KACHKACHI H., In situ synthesis of plasmonic nanoparticles in polymer thin films under laser and solar irradiation, GOLD 2018, Paris, Juillet 2018
694. NEVEU P., GROSJEAN A., THOMAS L., SOUM-GLAUDE A., Analyse exergétique des convertisseurs d'énergie solaire concentrée, Journées Exergie, Nancy, France, 22 - 23 November 2018, Oral
695. NOVAIS R.M., OLIVEIRA F.A.C., BARREIROS M.A., ABANADES S., CAETANO A.P.F., PULLAR R.C., Cork-derived ceria ecoceramics for solar fuel production via thermochemical redox process using concentrated solar energy, Workshop on: Solar Fuel Production Based on Nanostructured Photoelectrodes and Catalysts - Harvesting fuels from sunlight aiming to replace conventional fossil fuels, Brage (Portugal) 29-30 nov. 2018
696. PERONA. A., VOSSIER. A. CPV activities in PROMES laboratory, European Cooperation in Science and Technology (COST) Workshop-Multiscale-Solar-Marseille-2018, Marseille, France, September 2018, Oral
697. PETIT M., MARTIRÉ T., TALBERT T., « Optimisation globale d'un convertisseur DC-DC fortement élévateur pour application CPV », Symposium de génie électrique (SGE 2018), Nancy, 3-5 juillet 2018.
698. PIRIOU C., RAPAUD O., FOUCAUD S., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., Comparison of the oxidation behavior of HfB<sub>2</sub>-SiC and ZrB<sub>2</sub>-SiC Ultra-High Temperature Ceramics, 14th Int. Ceram. Congr. CIMTEC, Pérouse (Italie), 4-8 juin 2018
699. PIRIOU C., RAPAUD O., FOUCAUD S., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., Comportement à l'oxydation des composites ultra-réfractaires (Hf/Zr)B<sub>2</sub>-SiC à très haute température et au cyclage, Matériaux 2018, Strasbourg (France), 19-23 Nov. 2018, comm. Orale
700. PIRIOU C., RAPAUD O., FOUCAUD S., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., Comportement des composites ultra-réfractaires (Hf/Zr)B<sub>2</sub>-SiC sous atmosphère dissociée (oxygène atomique), Journées Annuelles du Groupe Français de la Céramique GFC, Bordeaux (France), 21-23 mars 2018
701. PONCIN D., FLAMANT G., TOUTANT A., BENOIT H., Etude d'un réacteur solaire horizontal à lit fluidisé pour la calcination, Journées nationales sur l'énergie solaire (JNES), Lyon, France, June 27-30, 2018.
702. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., Carbo-réduction d'oxydes par voie solaire concentrée pour la production de poudres métalliques destinées au stockage d'énergie et à la combustion, Matériaux 2018, Strasbourg (France), 19-23 nov. 2018
703. PULLAR R.C., NOVAIS R.M., CAETANO A.P.F., OLIVEIRA F.A.C., BARREIROS M.A., ABANADES S., KRISHNAKUMAR K.A., SURENDRAN K.P., The versatility of cork as a porous material: pyrolysed cork waste as an ultra-light-weight microwave EMI shielding or RAM material, and biomimetic ceria based on sustainable cork templates to split CO<sub>2</sub> using concentrated solar light to create renewable fuels, National Institute for Interdisciplinary Science & Technology (NIIST-CSIR), Trivandrum (Inde), 3 déc. 2018.
704. THIERY F., TALBERT T., ALMERGE M., « Contrat Enseignement Pédagogie Innovante : le CEPI », Colloque de l'Enseignement des Technologies de l'Information et des Systèmes 2018 (CETSIS 2018), Fès, Maroc, 27-29 octobre 2018.
705. THOMAS L., DI GIACOMO L., GROSJEAN A., NGOUE D., CARLING-PLAZA A., PARES V., SOUM-GLAUDE A., QUOIZOLA S., HERNANDEZ E., Développement de revêtements plasma à propriétés thermo-optiques pour les récepteurs de centrales solaires thermodynamiques à concentration, Matériaux 2018, Strasbourg, France, 19 - 23 November 2018, Oral
706. VERNAY F., DEJARDIN J.-L., RESPAUD M., KACHKACHI H., Effect of dipolar interaction and DC magnetic field on the SAR of an array of nanoparticles, 10th SpinS Workshop on Role of magnetism in energy harvesting and conversion by hybrid nanostructures (SpinS 2018), Perpignan, Octobre 2018

## 2019

707. BALAT-PICHELIN M., BARKA L., SANS J.L., ANNALORO J., Oxidation and emissivity at high temperature of metallic alloys from satellites during their atmospheric reentry, La Métallurgie, Quel Avenir !, Nancy (France) 8-12 Avril 2019.
708. BALAT-PICHELIN M., BECHE E., SANS J.L., ANNALORO J., Behavior of space debris materials in air plasma conditions at high temperatures simulating their atmospheric entry, 47th IUPAC World Chemistry Congress "Frontiers in Chemistry: Let's create our Future! 100 years with IUPAC", Paris (France), 5-12 juillet 2019.
709. BALAT-PICHELIN M., SANS J.L., BECHE E., CHARPENTIER L., FERRIERE A., CHOMETTE S., Emissivity at high temperature of metallic alloys for the design of solar receivers for future tower power plants, La Métallurgie, Quel Avenir !, Nancy (France) 8-12 Avril 2019.
710. BASTARDIS R., VERNAY F., KACHKACHI H., Magnetization nutation induced by surface effects in nanomagnets, International Conference on Fine Particles Magnetism, Gijon, Spain, Juin 2019
711. BECHE E., ESVAN J., FLAUD V., Etude microstructurale par XPS d'alliages à base de Fe-Ni et Fe-Ni-Cr traités à hautes températures, 2ème JSE2019, Nancy, France, 22-23 Janvier 2019
712. BECHE E., FLAUD V., XPS investigations of LaCeZrO mixed oxides (LCZO): Ce 3d final states and chemical environments of La and Zr atoms, 2ème JSE2019, Nancy, France, 22-23 Janvier 2019
713. CHARPENTIER L., CHEN D., COLAS J., MERCIER F., PONS M., PIQUE D., GIUSTI G., BALAT-PICHELIN M., Multilayer Multifunctional Advanced Coatings for Receivers of Concentrated Solar Power plants, 2019 MRS Spring Meeting and Exhibit, Phoenix (USA), 22-26 avril 2019.
714. CHARPENTIER L., COLAS J., BALAT-PICHELIN M., PONS M., CHEN D., MERCIER F., GIUSTI G., PIQUE D., Oxidation and evolution of optical and radiative properties of HT-CVD coated materials, 47th IUPAC World Chemistry Congress "Frontiers in Chemistry: Let's create our Future! 100 years with IUPAC", Paris (France), 5-12 juillet 2019.
715. DEJARDIN J.-L., FRANCO A., VERNAY F., KACHKACHI H., Surface anisotropy and inter-particle interactions in arrays of magnetic nanoparticles: General formalism and applications (FMR, T<sub>max</sub>), International Conference on Fine Particles Magnetism, Gijon, Spain, Juin 2019
716. ESVAN J., BECHE E., FLAUD V., BALAT-PICHELIN M., Investigation by SEM, XPS, AES, SAM and XRD of UHTC materials heated by solar energy, 2ème Journées sur les Spectroscopies d'Electrons, Nancy (France), 22-23 Janvier 2019, Nantes, France.

717. HAEUSSLER A., JOUANNAUX J., DROBEK M., AYRAL A., JULBE A., ABANADES S., Production de combustibles de synthèse par dissociation thermo-chimique de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> dans un réacteur solaire, 17ème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, SFGP 2019, 15-17 Octobre 2019, Nantes, France.
718. JOUANNAUX J., HAEUSSLER A., DROBEK M., AYRAL A., ABANADES S., JULBE A., Influence des paramètres de synthèse sur la frittabilité et la réactivité RedOx de poudres pérovskites pour la dissociation thermo-chimique du CO<sub>2</sub>, Journées Annuelles du Groupe Français de la Céramique, GFC 2019, Montpellier (France), 12-14 mars 2019
719. KACHKACHI H., Study of interacting assemblies of nanomagnets: Competing effects, Duisburg, Allemagne, Octobre 2019
720. MAURICE M., BARROS N., KACHKACHI H., Contrôle de la génération de porteurs chauds par des nanoparticules plasmoniques soumises à une irradiation solaire, Discussion Or-nano sur les électrons chauds, Bordeaux, Juin 2019
721. MAZET N., TAPACHES E., SALAS D., BOULNOIS G., PERIER-MUZET M., AUSSEL D., MAURAN M. Intégration d'un procédé de stockage thermo-chimique dans une centrale thermodynamique sous énergie solaire concentrée. SFGP (communication orale), Nantes, Oct. 2019
722. PIRIOU C., RAPAUD O., CHARPENTIER L., FOUCAUD S., BALAT-PICHELIN M., High temperature oxidation behavior of fully dense ZrB<sub>2</sub>/SiC and HfB<sub>2</sub>/SiC composites with various compositions in air plasma conditions, 47th IUPAC World Chemistry Congress "Frontiers in Chemistry: Let's create our Future! 100 years with IUPAC", Paris (France), 5-12 juillet 2019.
723. PONS M., CHEN D., JACQUEMIN M., SU J., BOICHOT R., MERCIER F., BLANQUET E., LAY S., COLAS J., CHARPENTIER L., BALAT-PICHELIN M., High temperature chemical vapor deposition of aluminum nitride thin films and coatings: properties and applications, 2nd International Conference on materials science and engineering, Le Caire (Egypte), 11-13 Mars 2019.
724. PUIG J., BALAT-PICHELIN M., Production métallique par énergie solaire concentrée pour de nouveaux cycles énergétiques durables, La Métallurgie, Quel Avenir !, Nancy (France) 8-12 Avril 2019.
725. VERNAY F., KACHKACHI H., Magnetization Dynamics in Chains of long-ranged coupled Magnetic Nanoparticles, International Conference on Fine Particles Magnetism, Gijon, Spain, Juin 2019

