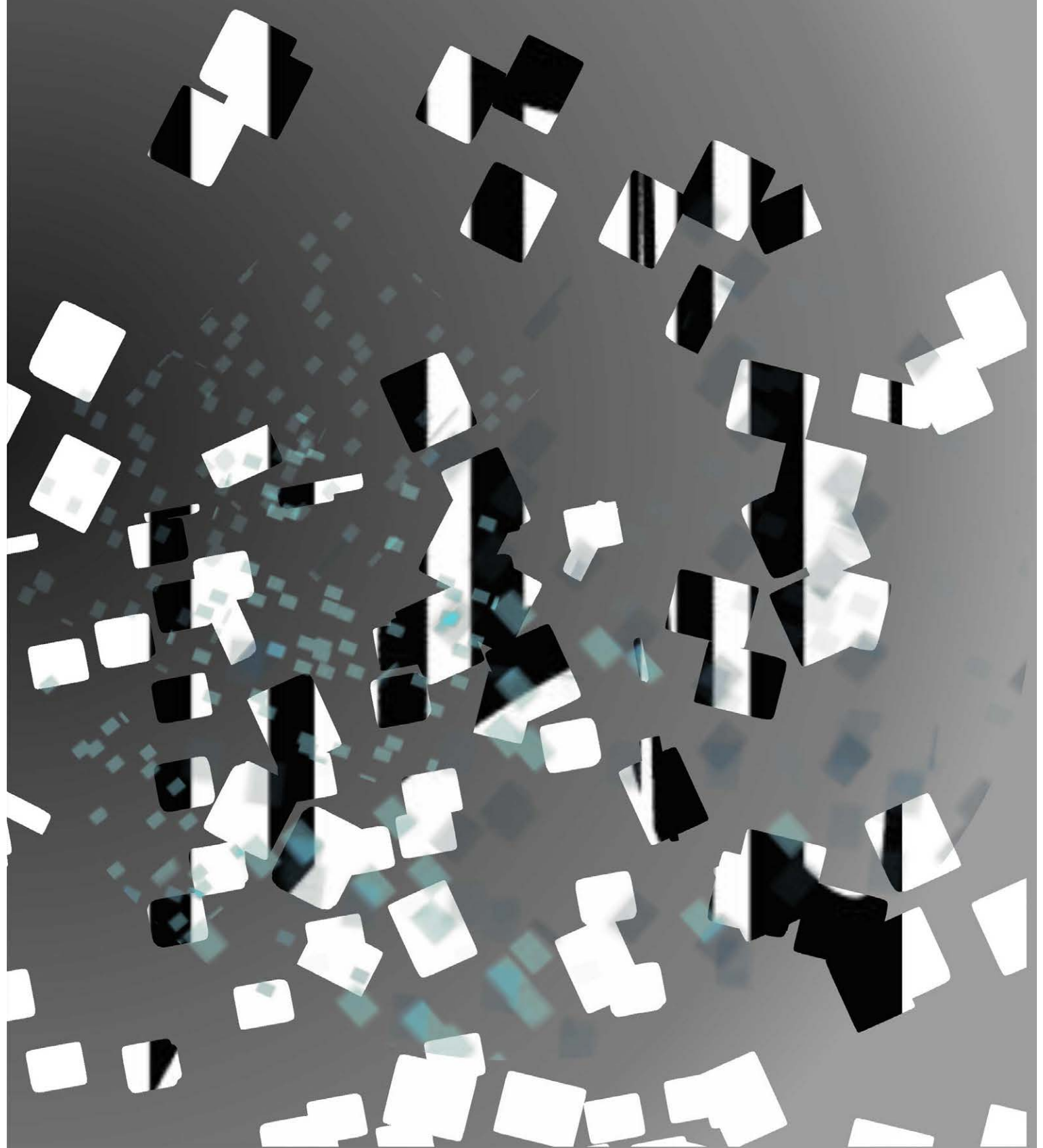


Electronique, Automatique et Systèmes - ELIAUS



Electronique, Automatique et Systèmes - ELIAUS

Fiche d'identité

Composition de l'équipe (ou participants)

Responsable(s) : S. Grieu, (PR UPVD)

Permanents : M. Caussanel, (MCF UPVD), B. Claudet, (PR UPVD), H. Duval, (TCE UPVD), J. Eynard, (MCF UPVD), O. Fruchier, (MCF UPVD), D. Gachon, (MCF UPVD), M. Polit, (PR émérite UPVD), T. Talbert, (MCF UPVD), F. Thiéry, (MCF UPVD), S. Thil, (MCF UPVD), A. Traoré, (MCF UPVD)

Non permanents :

Post doctorants : J. Nou (01/2013-12/2016)

Doctorants :

(1) thèses soutenues : S. Royer (date soutenance : 16/06/2014), M. Bressan (date soutenance : 19/06/2014), A. Chabaud (date soutenance : 04/07/2014), A. Garnier (date soutenance : 08/07/2014), M. Labidi (date soutenance : 30/04/2015) ;

(2) thèses en cours : R. Chauvin (date début : 01/01/2013), P. Leconte (date début : 22/04/2014), G. Beauvois (date début : 01/09/2014), E. Duverger (date début : 01/10/2015)

ATER : A. Salomé (09/2012-08/2013), A. Chabaud (09/2013-08/2015), S. Royer (09/2015-08/2016)

Mots clés

Modélisation, diagnostic et commande des systèmes, systèmes embarqués, micro-réseaux électriques, systèmes de production d'énergie, caractérisation de composants et de matériaux

Les thèmes

Micro-réseaux électriques : efficacité énergétique et gestion de la production décentralisée

Conduite et optimisation des systèmes de production d'énergie

Caractérisation de composants et de matériaux

Les collaborations

Nationales

- C. Calmon (Pyrescom, Canohès), J.M. Cabanat (Pyrescom, Canohès), A. Garnier (Pyrescom, Canohès), R. Falcand (Thermodyn, Le Creusot), D. Guénard (Thermodyn, Le Creusot), T. Palin-Luc (ARTS, Paris), J.P. Touzain (SPG, Montreuil), C. Pascual (Cylergie, Lyon), M. Labidi (Cylergie, Lyon), A.S. Provent (Cofely GDF-Suez, Lyon), D. Terrailon (Cofely GDF-Suez, Montpellier), G. Roux (LAAS-CNRS, Toulouse), C. Alonso (LAAS-CNRS, Toulouse), B. Jammes (LAAS-CNRS, Toulouse), P. Alexandre (La Compagnie du Vent, Montpellier), C. Pénin (La Compagnie du Vent, Montpellier), K. de Renty (upOwa, Paris), A. Foucaran (IES, Montpellier), P. Notinger (IES, Montpellier), S. Holé (Univ. Paris 6, Paris), A. Laurent (LIRMM, Montpellier), F. Briant (IBM, Montpellier), B. Dussardier (LPMC, Nice), M. Ude (LPMC, Nice), J.L. Bodnar (GRESPI, Reims), D. Dumur (Centrale-Supélec, Gif-sur-Yvette), H. Gueguen (Centrale-Supélec, Rennes), R. Bourdais (Centrale-Supélec, Rennes), C. Bourdil (EDF R&D, Chatou), D. Faille (EDF R&D, Chatou), S. Blairon (EDF R&D, Chatou), F. Taillade (EDF R&D, Chatou), D. Boldo (EDF R&D, Chatou), O. Gilard (CNES, Toulouse), P. Blanc (OIE Mines ParisTech, Sophia Antipolis), J. Legrand (GEPEA, Nantes), M. Titica (GEPEA, Nantes), J. Pruvost (GEPEA, Nantes), C. Bourguine (Sélec, Prades), D. Falguère (Sélec, Prades), Y. Fourmond (Uniteck, Béziers)

Internationales

- F. Mermoud (Université de Genève, Genève, Suisse), G. François (EPFL, Lausanne, Suisse), A. Català (UPC, Vilanova i la Geltrú, Espagne), C. Angulo (UPC, Vilanova i la Geltrú, Espagne), I. Berazaluze (Acciona Energia, Pampelune, Espagne), J. Arraiza Ruiz de Galarreta (Acciona Energia, Pampelune, Espagne), E. Guelbenzu Michelena (Acciona Energia, Espagne), A. Pagliantini (Nuovo Pignone, Florence, Italie), C. Carmone (Nuovo Pignone, Florence, Italie), C. Gueymard (Solar Consulting Services, Daytona Beach, USA), Y. N'Goran (LPMCT, Abidjan, Côte d'Ivoire), D. Laré (ACDI-Solar, Lomé, Togo)

Contrats

- CIFRE Pyrescom/PROMES-CNRS, *Système expert d'efficacité énergétique et de confort pour la gestion des bâtiments*, coordinateur : Pyrescom
- CIFRE Cofely GDF-Suez/PROMES-CNRS, *Développement d'un outil de simulation et d'optimisation de chaufferies collectives mixtes*, coordinateur : Cylergie (Cofely GDF-Suez)

- CIFRE EDF R&D/PROMES-CNRS, *Capteur à fibre optique basé sur l'effet Raman pour la mesure de hautes températures en environnement radiatif*, coordinateur : EDF R&D
- Contrat de collaboration CNES/PROMES-CNRS, *Caractérisation sous radiations de fibres optiques commerciales*, coordinateur : PROMES-CNRS
- Contrat de collaboration Uniteck/PROMES-CNRS, *Architecture innovante de convertisseurs onduleurs*, coordinateur : Uniteck
- Projet ANR DROID, *Développement d'un dosimètre à fibre optique distribué*, coordinateur : PROMES-CNRS
- Projet OSEO PRIMERGI, *Programme de Recherche, Ingénierie et Maintenance pour les Energies Renouvelables et leur Gestion Industrielle*, coordinateur : LAAS-CNRS
- Projet Région Languedoc-Roussillon RIDER, *Réseau et Inter-connectivité Des Energies classiques et Renouvelables*, coordinateur : IBM Montpellier
- Projet EUROGIA CSPIMP, *Concentrated Solar Power plant efficiency IMProvement*, coordinateur : Thermodyn (General Electric Oil & Gas)
- Projet PReSeD-CI EPNES-ASPA, *Estimation et prédiction du potentiel national d'énergie solaire et application au séchage de produits agricoles*, coordinateur : LPMCT, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire
- Projet CRE La Compagnie du Vent/PROMES-CNRS, *Réseau électrique intelligent pour les nouveaux usages*, coordinateur : La Compagnie du Vent

Références

12, 69, 92, 119, 120, 124, 164, 170, 171, 174, 186, 187, 208, 218, 239, 252, 253, 254, 258, 264, 274

Rapport scientifique

INTRODUCTION

Contexte national et international

L'équipe ELIAUS (Electronique, Automatique et Systèmes), aux activités pluridisciplinaires, compte dans ses rangs des automaticiens et des électroniciens. Elle possède une expertise reconnue, tant sur le plan national qu'international, en optimisation des systèmes complexes, notamment des systèmes énergétiques. Elle dispose d'un large panel de compétences, ce qui en fait la force, en particulier dans les domaines de la modélisation et de la commande des systèmes, du développement de systèmes embarqués et de capteurs innovants ainsi que de la caractérisation de composants et de matériaux. Les approches méthodologiques considérées sont plurielles et s'appuient en particulier sur les outils de l'intelligence artificielle, la commande prédictive et les outils du traitement du signal et de l'image. Les activités de l'équipe sont structurées selon trois axes thématiques : (1) l'efficacité des micro-réseaux électriques et la gestion de la production décentralisée, (2) la conduite et l'optimisation des systèmes de production, exploitant notamment l'énergie solaire, et (3) la caractérisation de composants et de matériaux. ELIAUS collabore, depuis plusieurs années, par l'intermédiaire de projets nationaux et internationaux, avec des acteurs majeurs du secteur de l'énergie (Cofely GDF-Suez, La Compagnie du Vent GDF-Suez, EDF, GE Oil & Gas, Acciona Energia...) et avec des entreprises locales (Pyrescom, Selemcom, Uniteck...). L'équipe, sur la base des besoins et des verrous scientifiques qu'elle a identifiés, souhaite renforcer son positionnement, d'une part, sur l'instrumentation et l'automatisation des centrales solaires à concentration (activité initiée en 2012 par l'intermédiaire du projet CSPIMP, projet au sein duquel la contribution d'ELIAUS a pour objet la prédiction à court terme de la disponibilité de la ressource solaire à des fins d'optimisation de la conduite de centrales à capteurs cylindro-paraboliques) et, d'autre part, sur la gestion de la production décentralisée d'énergie renouvelable, à l'échelle du micro-réseau électrique, qu'il soit résidentiel ou industriel. L'équipe, de par les compétences de ses membres, est en mesure d'apporter une contribution significative à ces domaines scientifiques.

Enjeux et défis

Dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles et, par conséquent, de développement d'une production d'énergie renouvelable, diffuse et intermittente, des solutions innovantes pour la gestion et la supervision des systèmes, promouvant l'efficacité énergétique, sont plus que jamais nécessaires. A l'échelle du micro-réseau électrique, qu'il s'agisse d'un bâtiment, d'un éco-quartier ou d'une zone industrielle, le pilotage des charges et des équipements, en particulier des systèmes de CVC, le stockage de la production locale et l'interaction avec le réseau électrique sont au cœur des préoccupations de l'équipe. Ainsi, ELIAUS et la Compagnie du Vent collaborent depuis quelques mois au développement d'un superviseur dédié à la gestion des flux d'énergie transitant au sein d'un micro-réseau industriel. Pour ce qui est de l'instrumentation et de l'automatisation des centrales solaires à concentration, le développement, avec l'appui d'EDF R&D, d'une stratégie de visée en boucle fermée destinée aux centrales à tour, ayant pour finalité le rejet des perturbations subies par le champ solaire, est à l'étude. Autre perspective à court terme, l'adaptation des outils développés dans le cadre du projet CSPIMP à la gestion des centrales PV du parc Acciona Energia qui seront, dans les mois à venir, équipées de systèmes de stockage. Par ailleurs, les activités de l'équipe traitant de la caractérisation de composants et de matériaux contribuent à la nécessaire efficacité des systèmes de production et de conversion d'énergie. La caractérisation de fibres optiques soumises à des radiations ionisantes, par la mesure de l'atténuation radio-induite sur une large gamme spectrale, destinées notamment au développement de capteurs innovants, répond à ce besoin. La caractérisation des couches de passivation, grâce à la méthode de l'onde thermique, ainsi que l'optimisation de la structure de cellules PV fonctionnant sous concentration, grâce à la mesure de la durée de vie des porteurs minoritaires, ont pour finalité l'amélioration des rendements des cellules solaires. Est également abordée la caractérisation thermophysique de matériaux pour, d'une part, l'étude et le suivi du vieillissement des récepteurs solaires et, d'autre part, la détection de défauts de structure non apparents. Des algorithmes innovants sont en cours de développement.

Objectifs scientifiques

Des modèles de connaissance, des modèles semi-paramétriques et des "boîtes noires" sont développés, grâce notamment aux outils de l'intelligence artificielle, selon la complexité des systèmes étudiés et le niveau d'information disponible. Les structures de contrôle-commande considérées sont plurielles, allant de solutions simples et facilement implantables *in situ* à des solutions avancées, permettant la résolution de problèmes d'optimisation sous contraintes. La commande prédictive, qui requiert l'anticipation du comportement à réguler, est, de par son efficacité et son adéquation avec les problèmes à résoudre, priorisée. Des systèmes embarqués sont également développés, tout comme des capteurs innovants et des outils pour la détection et l'identification de défauts (dysfonctionnements). La prédiction de la ressource énergétique, notamment solaire, à

partir de modèles basés sur la notion de série temporelle ou d'algorithmes de traitement d'images, fournies par des satellites ou des caméras au sol, est une composante importante du développement d'approches de gestion et de supervision.

Sommaire

- 1. Micro-réseaux électriques : efficacité énergétique et gestion de la production décentralisée*
 - 1.1. Modélisation multi-échelle du comportement thermique de bâtiments*
 - 1.2. Gestion prédictive des systèmes de CVC dans les bâtiments tertiaires*
 - 1.3. Gestion des ressources énergétiques au sein d'un micro-réseau résidentiel*

- 2. Conduite et optimisation des systèmes de production d'énergie*
 - 2.1. Evaluation de la ressource solaire pour la gestion de centrales CSP*
 - 2.2. Outil de supervision destiné aux installations solaires photovoltaïques*
 - 2.3. Conception d'un régulateur de charge MPPT pour les accumulateurs au plomb destinés aux applications photovoltaïques à faible puissance*
 - 2.4. Gestion prédictive de chaufferies collectives mixtes*

- 3. Caractérisation de composants et de matériaux*
 - 3.1. Caractérisation de fibres optiques en environnement radiatif*
 - 3.1.1. Evaluation de fibres optiques commerciales*
 - 3.1.2. Développement d'un dosimètre à fibre optique distribué*
 - 3.1.3. Capteur à fibre optique basé sur l'effet Raman pour la mesure de hautes températures en environnement radiatif*

 - 3.2. Caractérisation de diélectriques pour le solaire photovoltaïque*

1. MICRO-RESEAUX ELECTRIQUES : EFFICIENCE ENERGETIQUE ET GESTION DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE

Le premier axe thématique traite de l'efficacité énergétique et de la gestion de la production décentralisée au sein de micro-réseaux électriques. Sont ici présentées : (1.1) une procédure générique de modélisation multi-échelle du comportement thermique de bâtiments, développée dans le cadre du projet RIDER ("Réseau et Inter-connectivité Des Energies classiques et Renouvelables"), (1.2) une approche intelligente destinée au pilotage des systèmes de CVC zonés équipant les bâtiments tertiaires (projet Batnrj) et (1.3) une approche prédictive et multicritère de gestion des ressources énergétiques au sein d'un micro-réseau résidentiel.

1.1. Modélisation multi-échelle du comportement thermique de bâtiments

Contexte et objectifs

Le projet RIDER a été initié afin de montrer qu'il est possible de contribuer à l'efficacité énergétique d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments par l'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication. L'équipe ELIAUS du laboratoire PROMES-CNRS s'est ainsi intéressée à l'amélioration du pilotage des systèmes de CVC (cf. projet Batnrj). Les structures de contrôle les plus communément utilisées sont des TOR ("Tout Ou Rien") et des PID ("Proportionnel, Intégral, Dérivé"). Toutefois, ces structures ne permettent pas de prendre en compte les apports internes au bâtiment, ses propriétés intrinsèques (en particulier, son inertie thermique) ou des contraintes comme, par exemple, le prix de l'énergie. Une façon de pallier ces limitations est d'avoir recours à la commande prédictive, à savoir une stratégie avancée permettant de suivre une consigne, tout en satisfaisant à diverses contraintes. L'objectif est ici de prédire le comportement du système considéré, sur un horizon de temps, grâce à un modèle dynamique. Ces prédictions permettent d'anticiper la séquence de commande à appliquer au système afin d'atteindre la consigne désirée (le comportement désiré), tout en suivant une trajectoire de référence. C'est pourquoi, dans le cadre du projet RIDER, l'équipe ELIAUS a développé une procédure permettant de modéliser le comportement thermique de bâtiments ou de zones de bâtiments. Plusieurs échelles ont ainsi été considérées : l'échelle locale, à savoir une pièce, l'échelle dite "intermédiaire", plusieurs pièces ou un étage, et l'échelle globale, à savoir le bâtiment dans son ensemble. Cette procédure se veut générique, c'est-à-dire adaptable, sans évolution majeure, à différents types et configurations de bâtiments, quelle qu'en soit la localisation géographique. Le modèle doit par ailleurs être suffisamment simple afin d'être utilisable en tant que modèle interne d'une structure de commande prédictive.

Approche méthodologique

Afin d'étudier la faisabilité de ce travail, l'équipe ELIAUS s'est dans un premier temps attachée à modéliser un bâtiment réel à l'aide d'EnergyPlus, un logiciel de simulation thermique dynamique (STD). L'intérêt principal de cette étape préliminaire était de pouvoir effectuer des tests sur le modèle STD qu'il était difficile, voire impossible, de réaliser sur un bâtiment réel. Le bâtiment choisi est le département "énergétique et énergies renouvelables" de l'école d'ingénieurs Polytech Montpellier. Situé sur la zone d'activités économiques Tecnosud (à Perpignan), à moins de 100 m du laboratoire PROMES-CNRS, il a permis d'effectuer les tests nécessaires à la bonne avancée des travaux. Les relations privilégiées entre l'école et le laboratoire ont facilité l'accès et l'instrumentation des salles, la proximité entre les deux bâtiments autorisant la maintenance rapide et efficace du matériel déployé. Le modèle STD obtenu a pu être validé suivant plusieurs étapes (il est important de rappeler que le bâtiment était occupé pendant les expérimentations) : tout d'abord l'enveloppe, quelles que soient les conditions climatiques associées aux différentes périodes de l'année, puis le bâtiment équipé de son système de CVC. Les résultats obtenus furent jugés satisfaisants. Par conséquent, le modèle STD obtenu a pu être utilisé afin d'élaborer la procédure de modélisation multi-échelle du comportement thermique de bâtiments, objet de la contribution de l'équipe ELIAUS au projet RIDER. D'un point de vue méthodologique, le choix s'est porté sur les techniques d'identification des systèmes, ces techniques permettant l'obtention d'un modèle mathématique adéquat, à partir de données expérimentales. Par conséquent, aucune connaissance *a priori* du système à modéliser, quelle que soit l'échelle considérée, n'est nécessaire. A l'aide d'une co-simulation EnergyPlus/Matlab, il a été possible de : (1) sélectionner les signaux d'entrée et de sortie permettant de modéliser le comportement thermique du bâtiment considéré, (2) déterminer l'excitation minimale que doit subir le bâtiment afin que puissent être récoltées des données de fonctionnement suffisamment informatives et (3) constater qu'un modèle linéaire de type représentation d'état (une "boîte noire"), qui autorise la modélisation dynamique d'un système à partir de variables d'état, concilie simplicité et adaptabilité (à plusieurs échelles). Les résultats furent jugés satisfaisants, ce que soit à l'échelle locale (une pièce), à l'échelle intermédiaire (plusieurs pièces) ou à l'échelle globale (le bâtiment). Enfin, la dernière étape du travail effectué a consisté à valider le caractère générique de la procédure de

modélisation, à nouveau par l'intermédiaire d'une co-simulation EnergyPlus/Matlab, pour différents localisations (Tampa, San Francisco et Madison, aux Etats-Unis) et, par conséquent, différentes conditions climatiques et de ressources.

Résultats

Les principaux résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 1, pour toutes les pièces du bâtiment considéré. Ils sont globalement satisfaisants. Le coefficient de ressemblance (ou "fit") est, dans la majorité des cas, supérieur à 70 %. Toutefois, une baisse de performance a été constatée en cas de conditions climatiques extrêmes. Il est à noter qu'au cours de la période considérée, la température extérieure observée à Madison était d'environ -15°C.

Tableau 1 : Evaluation du modèle développé, pour différentes localisations ("fit", en %)

Ville	Perpignan	Tampa	San Francisco	Madison
Salle 01	73	73	78	72
Salle 02	71	74	75	69
Foyer	69	78	87	56
Bureau	70	78	85	70
Salle 11	70	68	86	67
Salle 12	74	77	81	66
Salle informatique	65	87	92	51
1 ^{er} étage	70	80	90	60
Bâtiment	71	79	88	62

1.2. Gestion prédictive des systèmes de CVC dans les bâtiments tertiaires

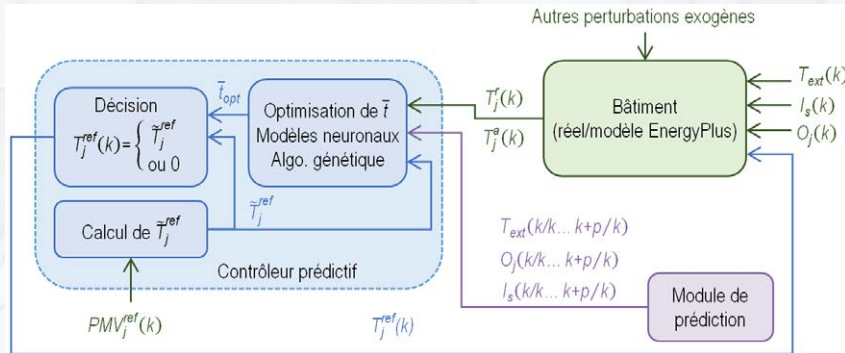
Contexte et objectifs

Le secteur du bâtiment, gros consommateur d'énergie, contribue de façon significative aux émissions de gaz à effet de serre. Les systèmes de CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation), souvent mal dimensionnés et/ou pilotés, parfois anciens et centralisés, sont à l'origine d'une part importante de cette consommation. C'est pourquoi, dans un contexte de nécessaire efficacité énergétique du secteur du bâtiment, la société Pyrescom s'est associée au laboratoire PROMES-CNRS afin de développer des approches intelligentes destinées au pilotage des systèmes de CVC zonés (projet Batnrj). Ces approches, à caractère prédictif, ont pour but d'optimiser le fonctionnement de ces systèmes afin d'en minimiser la consommation énergétique et de garantir le confort thermique des occupants du bâtiment. Les algorithmes développés, à coût calculatoire réduit, ont vocation à être implantés au sein d'un système embarqué. Le cas d'étude est un bâtiment tertiaire de la zone industrielle "Saint Charles" située à Perpignan. Trois pièces du bâtiment (des bureaux et une zone de production), thermiquement couplées mais régulées indépendamment, sont ici considérées pour le développement et la validation, dans un premier temps en simulation, des approches de gestion prédictive proposées.

Approche méthodologique

La première étape de ce travail a porté sur la modélisation du comportement thermique du bâtiment grâce au logiciel EnergyPlus afin de disposer d'un modèle permettant de réaliser des simulations et de tester/valider les approches de gestion des systèmes de CVC développées. L'isolation thermique du bâtiment, d'une surface de 1000 m² et orienté sud, satisfait à la réglementation thermique 2005 (RT 2005). Il est équipé d'un système de CVC zoné. L'approche développée permet de réguler par anticipation la température dans les pièces considérées, en mode "chauffage" ou "climatisation", avec l'objectif de déterminer les instants optimaux d'enclenchement et d'arrêt des différents sous-systèmes (\bar{t}_{opt}) : il est donc nécessaire de définir combien de temps avant l'arrivée des occupants il est nécessaire de démarrer ces sous-systèmes afin de garantir leur confort thermique et à partir de quelle heure il est possible de mettre fin à leur fonctionnement sans dégradation significative de ce confort, tant que le bâtiment tertiaire est occupé. Le PMV (*Predicted Mean Vote* ou, en français, vote moyen prédit) est utilisé comme indicateur de confort thermique. Six modèles paramétriques ont été développés, à partir de réseaux de neurones artificiels à apprentissage supervisé (l'algorithme d'entraînement dit de "corrélation en cascade" a été utilisé afin de rechercher les topologies optimales), pour les trois pièces considérées et les deux modes de fonctionnement. T_j^a et T_j^r sont les températures ambiante et radiative de la pièce j du bâtiment. Ces modèles sont internes à la structure de commande proposée et permettent l'estimation du PMV ainsi que de la puissance électrique consommée par les sous-systèmes de CVC. La structure s'appuie sur un module de prédiction et sur trois blocs (un bloc de calcul, un bloc d'optimisation et un bloc de décision). Les grandeurs exogènes, à savoir la température extérieure (T_{ext}) et l'irradiation solaire (I_s), sont prédites sur un

horizon de temps fixé à 8h. L'occupation des pièces du bâtiment (O_j , pour la pièce j) est connue. Le bloc de calcul définit à chaque pas de temps les consignes de température permettant aux contraintes de confort thermique d'être respectées. Le bloc d'optimisation recherche \bar{T}_{opt} afin de minimiser la puissance électrique consommée. Le bloc de décision, à partir des informations transmises par les blocs de calcul et d'optimisation, définit à chaque pas de temps les consignes de température destinées aux régulateurs des sous-systèmes. Finalement, le problème d'optimisation peut être formulé comme suit : minimiser la puissance électrique consommée tout en satisfaisant les contraintes de confort thermique, grâce à la détermination des instants optimaux d'enclenchement et d'arrêt des sous-systèmes de CVC.



Le problème est résolu grâce à un algorithme génétique, paramétré afin de limiter le coût calculatoire associé à la recherche de la solution optimale. A chaque pas de temps, la décision est prise d'enclencher un sous-système, de l'arrêter ou de ne pas modifier son mode de fonctionnement. La structure de commande proposée est robuste, rejetant efficacement les perturbations subies et les erreurs de modélisation (Figure 1).

Figure 1 : Structure du contrôleur prédictif proposé pour la gestion des systèmes de CVC (pièce j du bâtiment).

Résultats

Afin de quantifier l'apport de l'approche prédictive proposée, cinq stratégies basiques, fréquemment utilisées pour le pilotage des systèmes de CVC, zonés ou non, équipant les bâtiments tertiaires, ont été considérées. Avec S1, les systèmes fonctionnent 24h/24 et 7j/7. Avec S2, les systèmes fonctionnent continûment de 8h à 18h alors qu'avec S3, ils fonctionnent continûment de 6h à 16h. Avec S4, les systèmes alternent fonctionnement et non fonctionnement, par tranche d'une heure, de 6h à 17h. Avec S5, les systèmes fonctionnent de 5h à 7h, de 8h à 12h et de 13h à 18h. Ces stratégies sont appliquées du 1^{er} novembre au 31 mars (mode "chauffage") et du 1^{er} juin au 30 septembre (mode "climatisation"). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2. L'inconfort thermique est ici défini comme le pourcentage de temps pour lequel les contraintes de confort thermique ne sont pas respectées au sein du bâtiment (le PMV est en dehors de l'intervalle [-0.5 ; +0.5], défini comme l'intervalle de confort optimal). Clairement, quel que soit le mode de fonctionnement ("chauffage" ou "climatisation"), l'approche prédictive proposée (S6 dans le Tableau 2) offre le meilleur compromis entre confort thermique des occupants et consommation énergétique. En prenant S2 comme référence (il s'agit de la stratégie actuellement utilisée au sein du bâtiment tertiaire de la zone industrielle "Saint Charles", à Perpignan, pour piloter les sous-systèmes de CVC), la consommation énergétique est réduite de 15 % entre le 1^{er} novembre et le 31 mars et de 5 % entre le 1^{er} juin et le 30 septembre. L'inconfort thermique est quant à lui réduit de 56 % entre le 1^{er} novembre et le 31 mars et de 50 % entre le 1^{er} juin et le 30 septembre.

Tableau 2 : Performances des stratégies S1, S2, S3, S4, S5 et S6 en mode "chauffage", du 1^{er} novembre au 31 mars, et en mode "climatisation", du 1^{er} juin au 30 septembre.

Stratégie	Mode "chauffage"		Mode "climatisation"	
	Consommation énergétique [Wh/jour.m ²]	Inconfort thermique [%]	Consommation énergétique [Wh/jour.m ²]	Inconfort thermique [%]
S1	209,5	19,4	198,5	0,1
S2	80,9	14,4	122,6	0,2
S3	54,2	18,5	96,7	13,4
S4	59,5	17,6	90,5	25,4
S5	81,0	16,5	119,8	0,1
S6	69,0	6,4	116,2	0,1

1.3. Gestion des ressources énergétiques au sein d'un micro-réseau résidentiel

Contexte et objectifs

La raréfaction des ressources énergétiques fossiles, l'augmentation de la demande énergétique mondiale ainsi que la nécessité de réduire l'impact environnemental des émissions de gaz à effet de serre sont des enjeux majeurs. Pour y répondre efficacement, le développement des énergies renouvelables et la maîtrise de la demande, notamment dans le secteur résidentiel, gros consommateur d'énergie, sont des pistes intéressantes. Ainsi, des approches innovantes sont nécessaires afin de gérer la production locale, de piloter son injection sur le réseau électrique et de maintenir le nécessaire équilibre entre offre et demande. Les travaux entrepris traitent du développement et de la validation, en simulation, d'une approche intelligente et multicritère de gestion des ressources énergétiques au sein d'un micro-réseau résidentiel, à savoir un habitat individuel raccordé au réseau électrique qu'il est possible d'équiper de systèmes de production et de stockage d'énergie. Son isolation thermique satisfait à la réglementation thermique 2005 (RT 2005), ses charges sont pilotées. Deux stratégies sont ici proposées : une stratégie dite de référence, non prédictive, et une stratégie basée sur l'anticipation de la charge du micro-réseau considéré, de la charge du réseau électrique et de la production locale. Quelle que soit la stratégie, l'état du réseau électrique est pris en compte, via des seuils réseau, afin de minimiser l'impact des processus d'injection et d'extraction d'énergie. Le juste dimensionnement des systèmes de production et de stockage est au cœur des travaux entrepris, tout comme l'évaluation, d'une part, du mix-énergétique proposé et, d'autre part, des mécanismes de pilotage des charges du micro-réseau.

Approche méthodologique

Le comportement thermique de l'habitat considéré, ainsi que les systèmes de production (des panneaux solaires photovoltaïques et une éolienne à axe vertical) et de stockage (des batteries) d'énergie susceptibles de l'équiper, ont été modélisés. L'exploitation des courbes de charge de l'habitat a permis la mise en évidence des principaux vecteurs de consommation énergétique. Ce dernier est équipé d'un système de CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation) ainsi que d'un ballon d'eau chaude pour la production d'ECS (Eau Chaude Sanitaire). Les appareils électriques et électroniques sont pilotés par des régulateurs locaux. La température au sein d'une pièce est considérée comme homogène ; les gains thermiques résultant de l'apport solaire sont calculés pour chaque pièce de l'habitat. Le mode de vie des occupants a été modélisé, par l'intermédiaire de scénarios d'occupation et de comportement. Ces derniers impliquent des mécanismes de pilotage des charges qui contribuent à moduler la courbe de charge de l'habitat et, conjointement au pilotage des systèmes de production et de stockage, à réduire les contraintes pesant sur le réseau électrique, notamment en période de pointe. Des critères d'évaluation (énergétique/économique) sont définis : en particulier, le taux de couverture en énergie renouvelable ($\%_{\text{ENR}}$), le taux d'autoconsommation ($\%_{\text{ac}}$) et le coût économique ($J_{\text{coût}}$). Des critères relatifs à l'état du réseau électrique et à l'impact sur le réseau des processus d'injection (I_{inj}) et d'extraction (I_{ext}) d'énergie sont également proposés. L'impact global est défini comme suit : $I_{\text{tot}} = I_{\text{inj}} + I_{\text{ext}}$. L'état du réseau est évalué à partir de seuils, le seuillage effectué caractérisant la capacité du réseau à "absorber" une production décentralisée. Ainsi, un seuil réseau fixé à 30 % (resp. 70 %) définit un réseau électrique capable d'absorber une production décentralisée quelle que soit la période considérée (resp. uniquement en période de pointe). Ces critères permettent l'évaluation des stratégies proposées ainsi que du dimensionnement des systèmes de production et de stockage d'énergie. Que l'habitat considéré soit équipé ou pas d'un système de stockage, la stratégie de référence est définie sur la base de trois cas de figure : *surproduction*, *équilibre entre production et demande* et *sous-production*. Il en est de même pour la stratégie prédictive. Seule cette dernière est ici décrite. Elle s'appuie sur l'anticipation de la charge du micro-réseau, de la charge du réseau électrique et de la production locale d'énergie renouvelable.

- *Surproduction*. La production d'énergie renouvelable est supérieure à la consommation instantanée de l'habitat. La production locale satisfait donc la totalité des besoins énergétiques et, par conséquent, aucune énergie n'est soutirée au réseau électrique. La gestion de la production excédentaire est dépendante de l'état du réseau ainsi que de la capacité du micro-réseau à satisfaire ses besoins énergétiques lors du prochain pic de consommation. Si le réseau est soumis à une forte demande (période de pointe) et si le micro-réseau est à même de satisfaire ses besoins énergétiques, la production excédentaire y est injectée. Sinon, si les batteries ne sont pas déjà totalement chargées, la production excédentaire est en partie ou en totalité stockée.
- *Équilibre entre production locale et demande*. La totalité de l'énergie produite localement est autoconsommée. Toutefois, contrairement à la stratégie non prédictive, pour laquelle aucune interaction entre l'habitat, le réseau électrique et les batteries n'est nécessaire, de l'énergie pourra être soutirée au réseau, si ce dernier n'est pas soumis à une forte demande (période de pointe), afin de charger les batteries et de répondre à un futur pic de consommation auquel la production locale ne sera pas en mesure de faire face.
- *Sous-production*. La consommation instantanée de l'habitat est supérieure à la production d'énergie renouvelable. De ce fait, l'énergie produite localement est entièrement autoconsommée. Toutefois, contrairement à la stratégie non

prédictive, pour laquelle le déstockage de l'énergie présente dans les batteries est priorisé, il est tenu compte de l'état du réseau électrique ainsi que de la capacité du micro-réseau à satisfaire ses besoins énergétiques lors du prochain pic de consommation. Par conséquent, si le réseau électrique est soumis à une forte demande (période de pointe), le déstockage de l'énergie est priorisé. Hors période de pointe, l'énergie stockée dans les batteries n'est utilisée (déstockée) que si le micro-réseau est à même de satisfaire ses besoins énergétiques lors du prochain pic de consommation sans avoir recours à cette dernière. Dans le cas contraire, de l'énergie est soutirée au réseau électrique.

L'horizon de prédiction est ici glissant et variable. Il dépend de l'état du réseau électrique à l'instant considéré (en période creuse, pour un seuil réseau inférieur à 30 %, en période intermédiaire, pour un seuil réseau compris entre 30 et 70 %, ou en période de pointe, pour un seuil réseau supérieur à 70 %), ainsi que de son évolution à venir. Les grandeurs influentes sont prédites à partir d'observations corrigées par la température extérieure (pour la charge du micro-réseau et la charge du réseau électrique), l'irradiation solaire et la vitesse du vent (pour la production locale d'énergie renouvelable). Le problème d'optimisation peut être formulé comme suit : définir la puissance crête des panneaux solaires photovoltaïques (P_{PV}), la puissance crête de l'éolienne à axe vertical (si le bâtiment en est équipé) (P_{WT}) et la capacité nominale des batteries (si le bâtiment en est équipé) (E_{bat}) permettant de maximiser la fonction "objectif" choisie. Cette fonction (J_{ENR}) combine le taux de couverture en énergie renouvelable ($\%_{ENR}$) et le taux d'autoconsommation ($\%_{ac}$). Cette optimisation est contrainte, d'une part, par la surface disponible sur le toit de l'habitat afin d'y installer les panneaux solaires photovoltaïques et, éventuellement, l'éolienne à axe vertical et, d'autre part, par la surface au sol qu'il est possible de réserver aux batteries.

Résultats

Les résultats obtenus en simulation montrent qu'il est possible, grâce au juste dimensionnement des systèmes de production et de stockage d'énergie, dès lors qu'ils sont pilotés grâce à l'une des stratégies proposées, de répondre aux besoins énergétiques de l'habitat considéré, tout en minimisant l'impact du micro-réseau sur le réseau électrique. Ainsi, plusieurs configurations remarquables (Tableaux 3 et 4), promouvant l'autoconsommation et permettant d'obtenir un taux de couverture en énergie renouvelable élevé, sont mises en avant. Par conséquent, une meilleure adéquation entre offre et demande est observée. Il est intéressant de noter que la stratégie prédictive permet une meilleure gestion du système de stockage et l'optimisation des processus d'injection et de soutirage d'énergie, soit une meilleure intégration réseau, comparativement à la stratégie non prédictive.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que le mix énergétique proposé (à savoir des panneaux solaires photovoltaïques et une éolienne à axe vertical) est pertinent. Par contre, le pilotage des charges, du fait du nombre restreint de charges concernées, a un impact relativement limité sur l'efficacité énergétique du micro-réseau considéré.

Tableau 3 : Configurations remarquables, avec panneaux solaires photovoltaïques et système de stockage. Configurations 1 et 4 : stratégie prédictive. Configurations 2 et 5 : stratégie non prédictive, pour un seuil réseau fixé à 70 %. Configurations 3 et 6 : stratégie non prédictive, pour un seuil réseau fixé à 30 %.

Configuration	P_{PV} [kWc]	P_{WT} [kWc]	E_{bat} [kWh]	$\%_{ENR}$ [%]	$\%_{ac}$ [%]	J_{ENR} [%]	$J_{coût}$ [€]
1	8	n/a	140	29,17	66,76	19,47	-904
2	8	n/a	140	29,09	66,58	19,37	-904,8
3	8	n/a	140	20,46	46,84	9,59	-880,5
4	8	10	200	58,07	62,88	36,51	-165
5	8	10	200	58,07	62,88	36,51	-165
6	8	10	200	46,06	49,88	22,98	-131,9

Tableau 4 : Configurations remarquables, avec panneaux solaires photovoltaïques et système de stockage. Configurations 1 et 4 : stratégie prédictive. Configurations 2 et 5 : stratégie non prédictive, pour un seuil réseau fixé à 70 %. Configurations 3 et 6 : stratégie non prédictive, pour un seuil réseau fixé à 30 %.

Configuration	P_{PV} [kWc]	P_{WT} [kWc]	E_{bat} [kWh]	$I_{inj\ 30}$ [-]	$I_{ext\ 30}$ [-]	$I_{tot\ 30}$ [-]	$I_{inj\ 70}$ [-]	$I_{ext\ 70}$ [-]	$I_{tot\ 70}$ [-]
1	8	n/a	140	2601	3839	6440	1402	11314	12715
2	8	n/a	140	n/a	n/a	n/a	1404	5214	6617
3	8	n/a	140	3715	-2645	1069	n/a	n/a	n/a
4	8	10	200	4591	2105	6696	1434	6495	7929
5	8	10	200	n/a	n/a	n/a	1453	2694	4147
6	8	10	200	6672	-2077	4595	n/a	n/a	n/a

2. CONDUITE ET OPTIMISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION D'ENERGIE

Le deuxième axe thématique concerne l'optimisation des systèmes de production d'énergie. Sont ici présentés des travaux traitant : (1.1) de l'évaluation de la ressource solaire, à partir d'images du ciel fournies par une caméra hémisphérique, pour la gestion de centrales CSP (*Concentrated Solar Power*), (1.2) du développement d'un outil de supervision destiné aux installations solaires photovoltaïques, (1.3) de la conception d'un régulateur de charge MPPT pour les accumulateurs au plomb destinés aux applications photovoltaïques à faible puissance et (1.4) de la gestion prédictive de chaufferies collectives mixtes équipées de systèmes de stockage thermique.

2.1. Evaluation de la ressource solaire pour la gestion de centrales CSP

Contexte et objectifs

Le recours à la ressource solaire comme moyen de production d'énergie s'est fortement démocratisé au cours de la dernière décennie. Cette émergence s'explique, entre autres, par les aides et subventions étatiques, les récentes avancées technologiques de la filière solaire ainsi que le fort potentiel de son déploiement à grande échelle : en six heures, les déserts du monde reçoivent autant d'énergie que la population mondiale en consomme en une année. Parmi les moyens de production d'électricité exploitant l'énergie solaire, on distingue aujourd'hui deux grandes technologies : l'électricité solaire d'origine photovoltaïque (le solaire photovoltaïque) et celle d'origine thermique (le solaire à concentration ou CSP pour *Concentrated Solar Power*). Bien qu'actuellement la capacité installée du solaire photovoltaïque domine largement celle du CSP, les centrales CSP peuvent facilement être couplées à un système de stockage thermique, rendant leur production plus flexible que celle des centrales photovoltaïques. Cet atout sera décisif dans le développement de la filière CSP au cours des années à venir. Cependant, malgré un avenir prometteur, de nombreux défis restent à relever pour rendre la technologie compétitive face à des modes de production d'énergie plus conventionnels mais plus polluants. C'est pourquoi la recherche scientifique dans ce domaine, à laquelle le laboratoire PROMES-CNRS prend part, est en pleine expansion. Les travaux présentés ont été réalisés dans le cadre d'un projet européen (le projet CSPIMP, pour *Concentrated Solar Power efficiency IMProvement*) visant à améliorer la compétitivité des centrales solaires à concentration. Parmi les différents défis à relever, l'évaluation en temps réel de la disponibilité et de la variabilité de la ressource solaire est un point clé puisqu'elle permettrait une gestion optimisée des champs solaires et, par conséquent, une hausse de la productivité des centrales. L'objectif du projet est donc de développer un outil d'évaluation de la ressource solaire destiné à la gestion de centrales CSP, en particulier les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques du groupe Acciona Energia.

Approche méthodologique

Pour parvenir à l'objectif susmentionné, une étude approfondie des interactions entre le rayonnement solaire et l'atmosphère a tout d'abord été menée. Cette étude a notamment permis de constater que l'éclairement normal direct (ou DNI pour *Direct Normal Irradiance*) pouvait se scinder en une composante déterministe (l'éclairement par ciel clair) et une composante stochastique (l'indice ciel clair). Cette séparation en deux composantes est le point de départ de l'évaluation de la ressource solaire. Ainsi, l'estimation et la prévision de l'éclairement par ciel clair ont fait l'objet des premiers travaux. L'étude réalisée a nécessité le développement d'un outil de détection en temps réel de données "ciel clair". L'outil tire parti de la faible variabilité infra-journalière du trouble atmosphérique afin de décider de la situation du ciel à chaque nouvelle mesure du DNI. Deux sites ont été considérés : Perpignan et Golden, aux Etats-Unis. Lorsque la situation du ciel est considérée comme "ciel clair", l'opérateur peut optimiser ses marges de manœuvre et la centrale peut alors fonctionner de façon optimale. Dans le cas contraire, lorsque la situation du ciel est considérée comme nuageuse, l'opérateur surestime habituellement l'éclairement par ciel clair dans le but de préserver les équipements. Dans ce cas de figure, une évaluation plus fine de l'éclairement par ciel clair est nécessaire, afin de maîtriser les risques et ainsi s'approcher des conditions optimales de fonctionnement de la centrale. C'est pourquoi, dans un second temps, un modèle d'estimation de l'éclairement par ciel clair a été développé. Ce modèle s'appuie sur le trouble atmosphérique défini par Ineichen et sur la dernière situation ciel clair connue. Une fois l'opérateur en mesure, à chaque instant, de connaître ou d'estimer l'éclairement par ciel clair, une prévision infra-horaire de cet éclairement est souhaitable, notamment dans le but d'anticiper l'influence du mouvement apparent du Soleil sur le DNI. Cette prévision repose sur une méthodologie identique à celle utilisée pour l'estimation de l'éclairement par ciel clair.

Concernant l'analyse de la couverture nuageuse et la prévision de l'indice ciel clair, une caméra hémisphérique a été utilisée. Le recours à cet instrument est le fruit d'une étude approfondie des besoins spécifiques et des solutions techniques existantes dans le domaine de la vision industrielle. Au cours du projet, trois PSI (pour *PROMES Sky-Imager*) se sont ainsi succédés. Le premier PSI a permis à l'équipe ELIAUS de se familiariser avec les différentes problématiques et contraintes inhérentes à l'évaluation de la ressource solaire au moyen d'une caméra hémisphérique. Ce premier PSI est d'ailleurs toujours opérationnel.

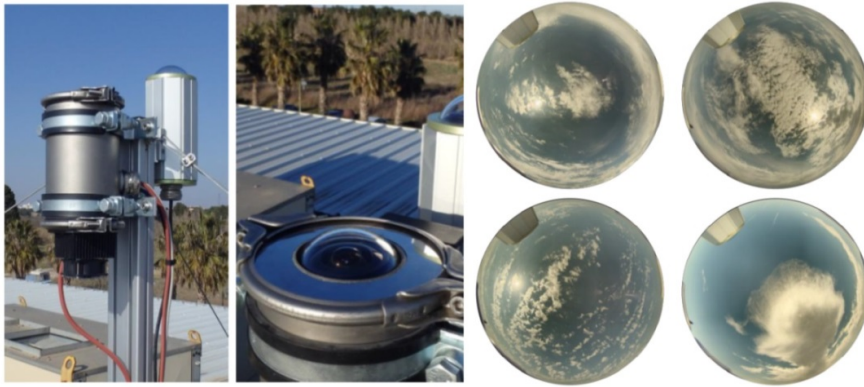


Figure 2 : Le PSI 3 et quelques clichés à haute dynamique.

Le second PSI fut un échec, dans la mesure où il n'a pas permis d'apporter de réponse aux limitations rencontrées par le PSI 1. Il fut donc rapidement remplacé par le PSI 3, dont l'innovation principale est sa capacité à générer des images HDR (*High Dynamic Range* ou, en français, à haute dynamique) (Figure 2).

Le PSI 3 est en effet capable de mesurer une information allant jusqu'à $0,9^\circ$ du Soleil, permettant ainsi la détection des nuages les plus exposés et, à terme, une évaluation du gradient lumineux dans la zone circumsolaire. Il est important de rappeler que ce gradient lumineux influence notamment sur les performances optiques du champ solaire. Son évaluation pourrait donc permettre à l'opérateur d'estimer plus finement l'énergie solaire réellement collectée par le récepteur, et ainsi améliorer sa production. Le PSI 3 se prête donc à un usage multifonctionnel, ce qui en fait un outil utile à la gestion d'une centrale CSP. Ce constat est partagé par Acciona Energia qui a investi dans un PSI 3 pour une installation sur site, à Palma del Rio (centrale solaire de Palma del Rio II), en Andalousie (Espagne) (Figure 3).



Figure 3 : Aperçu du système installé à Palma del Rio (centrale de Palma del Rio II, d'une puissance de 50 MW).

Les images prises par les PSI 1 et 3 ont permis le développement d'une série d'algorithmes dédiés à la détection des nuages et à l'estimation de leur mouvement. Pour ce qui est de la détection des nuages, la plupart des solutions existantes butent sur les nuages fins et la région circumsolaire. En effet, si les nuages fins sont régulièrement assimilés à du ciel clair, la région circumsolaire est quant à elle systématiquement identifiée comme un nuage, ce qui pénalise l'évaluation du taux de couverture nuageuse et, par conséquent, la qualité de la prévision infra-horaire du DNI. Pour tenter d'y remédier, un algorithme de détection des nuages a été développé. Cet algorithme s'appuie sur des images de synthèse d'un ciel dégagé, générées à l'aide d'une formulation de la distribution de la luminance dans le ciel spécialement développée pour résoudre le problème de la zone circumsolaire. Enfin, une étude de l'estimation du mouvement des nuages a été initiée. Elle aborde notamment l'optimisation d'un algorithme de correspondance de blocs, ainsi que les filtres spatial et temporel mis en place, afin d'évaluer le déplacement moyen de la couverture nuageuse. Sur la base de ces travaux, une étude de la prévision infra-horaire du DNI au moyen d'une caméra hémisphérique a été initiée. Dans cette étude, un modèle déterministe simple s'appuyant sur la fraction de nuages s'est révélé capable de surpasser la persistance à partir d'un horizon d'environ 23 minutes.

Résultats

Le modèle "ciel clair" développé, basé sur le trouble atmosphérique défini par Ineichen et sur la dernière situation ciel clair connue, a permis de maintenir l'erreur absolue moyenne commise sur l'estimation de l'éclairement par ciel clair en deçà de 40 W/m^2 , sur la période testée (à savoir 1 an) et pour les deux sites étudiés (Perpignan et Golden, aux Etats-Unis). Pour ce qui est de la prévision de l'éclairement par ciel clair, qui repose sur une méthodologie identique à celle utilisée pour son estimation, l'erreur quadratique moyenne obtenue est environ de 20 W/m^2 , pour un horizon de prévision de 30 minutes. Enfin, concernant la prévision infra-horaire du DNI au moyen d'une caméra hémisphérique, l'erreur quadratique moyenne obtenue est ainsi de l'ordre de 180 W/m^2 , toujours pour un horizon de prévision de 30 minutes, contre 190 W/m^2 pour le modèle persistant (même horizon). Le résultat est certes modeste, mais s'avère encourageant car de nombreuses pistes d'amélioration sont encore possibles. Ainsi, dans les perspectives à court terme, le principal problème à résoudre concerne les réflexions parasites survenant dans le système optique. En effet, ces réflexions dégradent la qualité des images HDR, induisant en erreur la plupart des algorithmes développés. Une fois le problème des réflexions résolu, il sera possible d'augmenter la densité du filtre et ainsi augmenter la dynamique de l'image. Le Soleil pourra alors être observé sans saturation des pixels, un nouvel algorithme de détection de situation ciel clair pourra être développé et le gradient lumineux dans la région circumsolaire pourra être étudié plus précisément. Il est par ailleurs souhaitable de poursuivre les recherches entreprises dans le domaine de la prévision infra-horaire du DNI. Dans les perspectives à moyen et long termes, il serait souhaitable de faire une étude sur la mesure des différents rayonnements (GHI, DNI, DHI) à l'aide des images prises par le PSI. À plus long terme, une étude en vision stéréoscopique est également envisagée afin de déterminer la hauteur des masses nuageuses pour ensuite en projeter l'ombre sur la centrale et ainsi réaliser une prévision spatiale du DNI. Ces travaux devraient permettre de franchir une nouvelle étape dans l'optimisation de la centrale, notamment en adaptant en temps réel le débit du fluide caloporteur sur la base de la distribution escomptée du DNI sur le champ solaire.

2.2. Outil de supervision destiné aux installations solaires photovoltaïques

Contexte et objectifs

Suite à diverses modifications du tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque (PV), cette dernière est devenue, au fil des années, de plus en plus onéreuse. Par conséquent, le temps de retour sur investissement associé à une installation solaire photovoltaïque est devenu de plus en plus long. Un système de supervision efficace peut contribuer à limiter les pertes de production, optimiser les performances des installations et ainsi diminuer ce temps de retour sur investissement. Les travaux présentés ici, effectués dans le cadre du projet PRIMERGI (Programme de Recherche, Ingénierie et Maintenance pour les Energies Renouvelables et leur Gestion Industrielle), ont porté sur la réalisation, le test et la mise en place d'un système d'acquisition de données destiné aux installations solaires photovoltaïques raccordées au réseau électrique. Les mesures effectuées ont permis le développement d'une approche de détection de défauts pour la conduite et la supervision de ces installations. La production photovoltaïque est ainsi suivie et évaluée en temps réel.

Approche méthodologique

Deux installations photovoltaïques, l'une située à Perpignan (au laboratoire PROMES-CNRS), l'autre à Toulouse (au LAAS-CNRS, le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) ont été considérées au cours des travaux. L'installation du laboratoire PROMES-CNRS est constituée de trois champs photovoltaïques, connectés grâce à cinq onduleurs. Sa puissance est de $14,5 \text{ kWc}$. A Toulouse, le LAAS-CNRS dispose depuis 2012 d'un bâtiment dédié à l'optimisation énergétique et à l'intelligence ambiante, à savoir l'étude des objets communicants de demain. Une surface photovoltaïque de 720 m^2 , constituée de trois champs d'une puissance totale installée de 100 kWc , équipe le bâtiment. Les onduleurs sont

pourvus de systèmes d'acquisition intégrés. A partir de données collectées à Perpignan, et grâce au logiciel Matlab, un modèle d'ensoleillement a été développé. Ce modèle permet l'estimation de l'ensoleillement reçu par un champ photovoltaïque incliné à partir de l'ensoleillement global horizontal. L'analyse énergétique des installations de Perpignan et de Toulouse a par ailleurs permis d'en évaluer les performances, en particulier d'en quantifier les pertes lors du fonctionnement. Ces travaux ont mis en lumière la pertinence de considérer la caractéristique courant-tension (ou caractéristique I-V) des générateurs PV, sources de pertes importantes, comme outil d'évaluation. Ainsi, l'approche de détection de défauts proposée s'appuie, d'une part, sur la mesure de puissance effectuée par le système d'acquisition développé et, d'autre part, sur l'analyse fine de la caractéristique susmentionnée.

Résultats

Pour ce qui est du modèle d'ensoleillement, en cas de ciel "partiellement nuageux", l'erreur relative moyenne observée est inférieure à 20 %. En cas de ciel "très nuageux", le niveau d'erreur est plus important. Grâce aux différentes analyses effectuées, une méthodologie complète et efficace pour la détection et l'identification de défauts a pu être proposée. Elle contribue à l'optimisation de la production photovoltaïque. L'utilisateur est ainsi prévenu en temps réel de la survenance d'un défaut, de la nature de ce défaut et de sa localisation. Grâce à cette approche, ont pu être détectés les défauts d'ombrage, les dysfonctionnements de l'onduleur ou du système d'acquisition et l'activation d'une ou de plusieurs diodes by-pass.

2.3. Conception d'un régulateur de charge MPPT (suivi du point maximal de puissance) pour les accumulateurs au plomb destinés aux applications photovoltaïques de faible puissance

Cette activité, menée en collaboration avec la société Uniteck, traite de la mise en œuvre de régulateurs de charge pour les applications faible puissance en sites isolés. Les accumulateurs au plomb sont encore très utilisés, du fait de leur faible coût et de leur simplicité de fabrication. Toutefois, ils présentent des inconvénients, en particulier une faible durée de vie et une sensibilité envers l'exploitation incorrecte (comparativement aux batteries Li-ion). Autrement dit, la durée de vie d'un accumulateur au plomb dépend des paramètres de charge et de décharge. Il est donc important que des dispositifs assurent une charge correcte et, en cas de sulfatation (comme conséquence d'une décharge profonde), soient capable de la rétablir. On appelle ces dispositifs des "régulateurs de charge" ou "chargeurs". Les travaux ont pour finalité l'augmentation de la durée de vie des accumulateurs au plomb et l'amélioration du rendement de la chaîne de conversion électrique. Afin de diminuer le temps de charge, il est recommandé d'utiliser des impulsions de courant au stade final de la charge (de 80 à 100 %). Le courant pulsé diminue le déséquilibre ionique (au cours de la charge à courant pulsé, la diffusion optimise la répartition des ions dans le volume d'électrolyte et la densité de courant augmente). La dissipation de la chaleur baisse la température dans l'accumulateur et permet, d'une part, de ralentir le grossissement de grains de la matière active et, d'autre part, de diminuer le développement de la couche de corrosion au cours du cyclage. Ceci doit contribuer à une augmentation de la durée de vie. L'algorithme P&O (*Perturb and Observe*) a été utilisé dans la recherche du point maximum de puissance. Les architectures considérées sont de type *Buck*, *Boost* ou *Buck-Boost*. Les résultats expérimentaux montrent des rendements supérieurs à 80 %, pour une chaîne de conversion de l'énergie électrique pas complètement optimisée à ce jour.

2.4. Gestion prédictive de chaufferies collectives mixtes

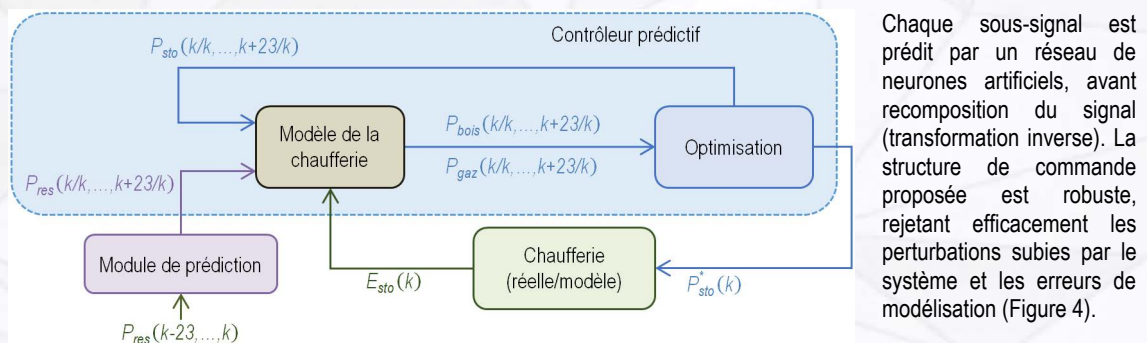
Contexte et objectifs

Dans le contexte actuel de nécessaire réduction de la consommation énergétique fossile, ainsi que des émissions de gaz à effet de serre qui lui sont associées, le groupe Cofely GDF-Suez (nouvellement ENGIE) cherche à optimiser les performances des chaufferies collectives mixtes (ou "multi-énergies") du parc qu'elle exploite. Ces chaufferies ont recours à des ressources énergétiques renouvelables (du bois) et fossiles (du gaz et/ou du fioul) afin de fournir de l'eau chaude sanitaire et du chauffage, via un réseau de chaleur urbain, aux habitations et aux bâtiments publics qui y sont raccordés (Figure 4). Il est possible d'optimiser les performances de ces chaufferies, les générateurs de chaleur étant généralement mal dimensionnés, grâce, d'une part, à une meilleure utilisation de l'énergie renouvelable et, d'autre part, à l'augmentation des rendements d'exploitation. Cette optimisation doit permettre une meilleure adéquation entre besoins et production de chaleur. Le stockage de l'énergie thermique est une option intéressante qui peut contribuer à l'optimisation du fonctionnement des chaudières biomasse qui, à bas régime, ont un rendement qui se détériore de façon significative et qui, par ailleurs, ont du mal à répondre à de brusques variations de puissance. Ainsi, l'installation d'un système de stockage de type "hydro-accumulation" au sein d'une chaufferie collective équipée d'une chaudière biomasse doit permettre de "lisser" le fonctionnement journalier de cette dernière. Encore faut-il être en mesure de gérer correctement le stockage et le déstockage de l'énergie thermique sur la base des besoins immédiats, mais aussi des besoins à venir, ainsi que de l'état

d'enclenchement des différents générateurs de chaleur (les chaudières). C'est pourquoi Cylergie, le centre de recherche et développement de Cofely GDF-Suez, s'est associé au laboratoire PROMES-CNRS afin de développer un outil de dimensionnement et de gestion prédictive des systèmes de stockage de type hydro-accumulation destinés aux chaufferies collectives exploitées par le groupe.

Approche méthodologique

La première étape de ce travail collaboratif a porté sur la modélisation du principe de fonctionnement d'une chaufferie collective mixte. Le modèle développé se veut générique et, par conséquent, facilement adaptable, moyennant l'identification de ses paramètres, à différentes configurations. Un modèle décrivant le phénomène de stratification survenant au sein d'un ballon d'eau chaude a ensuite été développé et validé expérimentalement. Une étude paramétrique a été menée afin d'étudier l'impact, sur les pertes thermiques, des principaux paramètres géométriques et météorologiques. Il est important de rappeler que l'efficacité d'un système de stockage thermique de type hydro-accumulation dépend de sa capacité à conserver l'énergie initialement stockée. Ainsi, afin de minimiser les pertes thermiques, le système doit être correctement isolé. Dans un deuxième temps, une approche de dimensionnement, fondée sur une stratégie de gestion séquentielle, a été proposée. Cette stratégie permet de définir, à chaque pas de temps, en fonction de la puissance appelée par le réseau de chaleur urbain ($P_{rés}$), des caractéristiques des chaudières et du volume du système de stockage, l'état d'enclenchement des différentes chaudières ainsi que la quantité d'énergie à stocker ou à déstocker. Cette phase des travaux a permis le développement d'un outil d'aide au dimensionnement des systèmes de stockage, cet outil est utilisé par Cylergie afin d'évaluer la pertinence de l'ajout de systèmes de type hydro-accumulation à ses chaufferies. Plusieurs critères énergétiques et économiques ont été évalués. Enfin, une stratégie fondée sur la commande prédictive a été proposée. Cette approche permet de minimiser une fonction de coût, définie à partir des puissances bois (P_{bois}) et gaz (P_{gaz}), sur l'horizon de temps choisi. Ainsi, l'optimiseur recherche, à chaque pas de temps, la puissance de stockage ou de déstockage (P_{sto}) minimisant le coût économique associé à la consommation de combustible ($J_{coût}$). Le modèle de la chaufferie est initialisé sur la base de la quantité d'énergie stockée à l'instant considéré (E_{sto}). Corollaire : satisfaire le taux de couverture bois contractuel (habituellement, 92 %). La structure de commande décide par ailleurs du fonctionnement de la chaudière biomasse. Afin de mettre en œuvre cette stratégie, la puissance thermique appelée par le réseau de chaleur doit être prédite sur l'horizon de temps choisi (en l'occurrence, 24 heures). Par conséquent, un outil de prédiction a été développé. Il exploite la notion de série temporelle et s'appuie sur une analyse multirésolution par transformée en ondelettes discrète ainsi que sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels à propagation avant (des réseaux multicouches à apprentissage supervisé). L'analyse multirésolution permet la décomposition d'un signal de forte variabilité en sous-signaux de variabilité plus faible (des coefficients d'approximation, ou basse fréquence, et de détail, ou haute fréquence) qu'il est, par conséquent, plus facile à prédire.



Chaque sous-signal est prédit par un réseau de neurones artificiels, avant recombinaison du signal (transformation inverse). La structure de commande proposée est robuste, rejetant efficacement les perturbations subies par le système et les erreurs de modélisation (Figure 4).

Figure 4 : Structure prédictive proposée pour la gestion d'une chaufferie collective équipée d'un système de stockage thermique de type hydro-accumulation.

Résultats

Les stratégies séquentielle et prédictive ont été appliquées à une chaufferie collective mixte située dans une commune de l'est de la France, à savoir Cernay (dans le Bas-Rhin). Les performances du site sont comparées aux performances observées en l'absence de stockage d'énergie (cas de référence) (Tableau 5). Pour ce cas d'étude, la stratégie prédictive démontre son efficacité. De plus, les résultats obtenus mettent en lumière que, quelle que soit la stratégie utilisée, équiper la chaufferie d'un système de stockage thermique de type hydro-accumulation, dès lors qu'il est correctement dimensionné, est un investissement rentable. La consommation en énergie fossile est minimisée et, par conséquent, le même constat s'applique au coût économique et aux émissions de CO₂. Le Tableau 5 met en lumière que l'ajout d'un système de stockage

d'un volume de 200 m³, piloté grâce à la stratégie séquentielle, permet de réaliser un gain économique conséquent (480 k€) sur la durée d'exploitation du site (24 ans), pour un taux de couverture bois supérieur à 90 %. Stocker l'énergie thermique permet par ailleurs de limiter la diminution de ce taux de couverture, en cas d'augmentation de la puissance appelée par le réseau de chaleur. La stratégie prédictive autorise une meilleure exploitation du système d'hydro-accumulation (à volume égal), diminuant ainsi le Temps de Retour Brut sur investissement (TRB) et augmentant le gain économique, sur la durée d'exploitation du site, de près de 140 k€.

Tableau 5: Performances des stratégies séquentielle et prédictive (Cernay, Bas-Rhin).

Stratégie	Référence	Séquentielle	Prédictive
Volume optimal [m ³]	n/a	200	200
Coût du système de stockage [k€]	n/a	98	98
Temps de retour brut sur investissement [année]	n/a	4,07	3,29
Gain [k€]	n/a	478,67	615,21
Taux de couverture bois [%]	86,12	93,76	95,88
Taux de couverture bois [%] avec P _{rés} + 10 %	75,65	82,27	85,52
Taux de couverture bois [%] avec P _{rés} + 20 %	61,01	65,36	67,49

3. CARACTERISATION DE COMPOSANTS ET DE MATERIAUX

Le troisième axe thématique traite de la caractérisation de composants et de matériaux. Sont ici présentés les travaux suivants : (1.1) la caractérisation de fibres optiques en environnement radiatif et (1.2) la caractérisation, par la méthode de l'onde thermique, de diélectriques pour le solaire photovoltaïque.

3.1. Caractérisation de fibres optiques en environnement radiatif

L'activité *Caractérisation de fibres optiques en environnement radiatif* se divise en trois volets : (1) l'évaluation de fibres optiques commerciales dans le cadre de contrats de collaboration avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES, Toulouse), (2) le développement, en collaboration avec le LPMC (Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Nice) d'un dosimètre à fibre optique distribué (projet ANR DROÏD), et (3) l'étude d'un capteur à fibre optique basé sur l'effet Raman pour la mesure de hautes températures en environnement radiatif (thèse CIFRE en collaboration avec EDF R&D, Chatou).

3.1.1. Evaluation de fibres optiques commerciales

Depuis 2008, l'équipe ELIAUS du laboratoire PROMES-CNRS collabore avec le CNES à l'évaluation de fibres optiques commerciales. Les études entreprises permettent d'identifier des composants pertinents, ainsi que leurs longueurs d'onde d'utilisation optimales, pour un fonctionnement en environnement radiatif. Cette collaboration durable, qui fait l'objet de contrats successifs, assure le développement et l'amélioration régulière du banc qui permet la mesure de l'Atténuation Radio-Induite (ARI) dans les fibres testées. Ces dernières sont choisies en réponse à un besoin précis, dans le cadre d'un projet spatial en cours, ou alors sélectionnées parmi les composants disponibles sur le marché, sur la base d'une logique de prospection. Les échantillons sont soit achetés, soit obtenus gracieusement, en échange des résultats des mesures, via des partenariats initiés avec des fabricants, des distributeurs et des utilisateurs de fibres. Sur la période concernée, des fibres optiques fabriquées par la société Draka (Prysmian Group) ont été caractérisées. Les résultats expérimentaux obtenus depuis le début de l'activité sont désormais rassemblés dans une base de données en ligne nommée RadFiber (<http://radfiber.univ-perp.fr>). Depuis son ouverture au public en juin 2015, 56 demandes d'accès émanant de 45 établissements ont été comptabilisées. La liste rassemble des laboratoires, des instituts ainsi que des entreprises nationales et internationales du domaine. A ce jour, RadFiber met à disposition des mesures d'ARI réalisées sur 11 références de fibres, les doses testées atteignent 495 Gy, les débits de doses s'échelonnent de 2,98 à 10 Gy/h, certaines irradiations ont par ailleurs eu lieu à plusieurs températures (-50, 17 et 60 °C). Au total, 198242 valeurs d'ARI sont disponibles.

3.1.2. Développement d'un dosimètre à fibre optique distribué

Dans le cadre de l'appel à projets RSNR (Recherche en Sécurité Nucléaire et Radioprotection) de l'ANR, l'équipe ELIAUS du laboratoire PROMES-CNRS a obtenu en mai 2013 une réponse positive pour la réalisation du projet DROÏD. Ce projet, mené en collaboration avec le LPMC de l'Université de Nice, a pour objectif le développement d'un dosimètre à fibre optique distribué. Ce dosimètre ne fonctionnera pas à partir d'une fibre scintillante dont le principe ne permet pas de localiser précisément la portion de fibre irradiée.

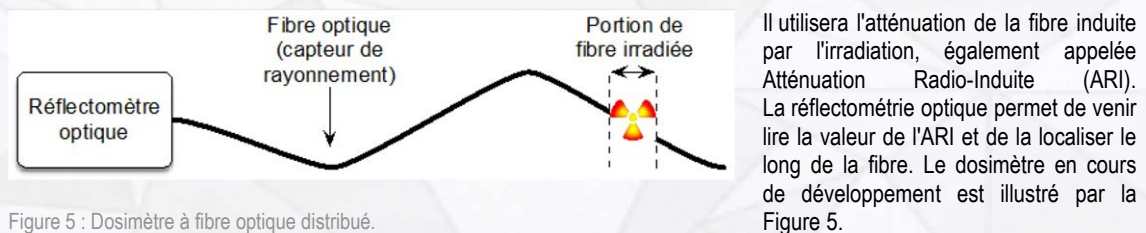


Figure 5 : Dosimètre à fibre optique distribué.

Des calculs préliminaires destinés à estimer la sensibilité du dosimètre ont montré la nécessité de développer une fibre bien plus sensible aux radiations que les fibres multimodes typiques dédiées aux télécommunications. Pour atteindre cet objectif, une bibliographie portant sur la réponse aux radiations des fibres a été réalisée. L'objectif de ce travail était d'établir des liens entre, d'une part, la composition et les paramètres de fabrication d'une fibre, et, d'autre part, son ARI. 137 articles ont été sélectionnés, analysés puis synthétisés en un rapport d'une vingtaine de pages. Ce document se termine par la définition de quatre compositions de fibre. Pour la 1^{ère} campagne d'irradiation du projet, le LPMC a proposé de sélectionner dans leur

liste de fibres déjà fabriquées celles dont la composition est la plus à même de présenter une ARI élevée. Onze bobines ont été fournies à PROMES-CNRS et ont ensuite été préparées en vue de la campagne d'irradiation qui s'est tenue à l'ONERA. A son issue, la grande quantité de données enregistrée a nécessité le développement d'un programme informatique pour calculer rapidement l'ARI de chaque échantillon de fibre. L'analyse de ces données a mis en évidence les éléments suivants. Concernant le développement d'un capteur avec fading (c'est-à-dire avec guérison partielle de la fibre après irradiation), la première campagne a permis d'identifier deux fibres potentiellement intéressantes du fait de leur ARI élevée (de l'ordre de 0,01 dB/m pour une dose de 0,1 Gy et à une longueur d'onde de 850 nm). Concernant la piste sans fading, il a été observé que les cinq fibres contenant du phosphore (P), dont la propriété est d'inhiber le fading, ont toutes montré une guérison significative après l'arrêt de l'irradiation. Le développement d'un capteur sans fading nécessite donc l'incorporation de plus de phosphore dans la matrice vitreuse. Ainsi, la deuxième campagne d'irradiation sera principalement axée sur des fibres présentant une haute teneur en P. Le fonctionnement du dosimètre nécessite une modélisation précise de la réponse aux radiations du capteur en fonction du débit de dose, de la température et de la puissance optique transportée par la fibre. Une première étape dans la modélisation de l'ARI est de déterminer une procédure expérimentale adéquate, permettant de récolter des données suffisamment riches en information afin d'en assurer la réussite. Pour ce faire, à partir des connaissances du processus, plusieurs jeux de données factices ont été générés afin de reproduire le comportement d'une fibre optique avec fading soumise à des radiations ionisantes. Ces données ont permis de procéder à des tests classiques, ainsi que d'explorer différents cas de figure en simulation.

3.1.3. Capteur à fibre optique basé sur l'effet Raman pour la mesure de hautes températures en environnement radiatif

EDF R&D travaille depuis une dizaine d'années à la qualification de chaînes de mesure de température par fibre optique utilisant des interrogateurs Raman. Aujourd'hui, des potentialités d'utilisation d'une telle mesure répartie ont émergé dans le domaine du nucléaire, suite à l'amélioration de la résolution spatiale des interrogateurs. Dans le cadre d'une thèse CIFRE initiée en avril 2014, EDF R&D et PROMES-CNRS mènent des études aux objectifs multiples. Il s'agit ici de déterminer les paramètres influant sur une mesure de température par effet Raman dans un environnement soumis aux hautes températures et aux radiations, de définir le système de mesure (le type de câble optique, le gainage, etc.) à employer dans ce milieu et de proposer une méthode pour calibrer l'interrogateur. Initialement, il a été estimé que le Capteur de température à Fibre Optique (CFO) devait résister à un débit de dose γ de 0,6 Gy/h pendant 12 mois (soit une dose intégrée d'environ 5 kGy) à 350 °C. De nouvelles estimations obtenues à l'aide du logiciel de simulation MCNP précisent que le capteur devra résister à une dose intégrée de l'ordre de 20 kGy (prise en compte du rayonnement γ originel du N^{16} ainsi que des rayonnements secondaires émis). Un premier essai a eu lieu sur la plateforme Saphir du CEA à Saclay. Le débit de dose élevé de la source (Linac) a permis d'atteindre une dose cumulée d'environ 1 kGy sur un CFO à température ambiante. Le retour d'expérience a montré que l'ARI obscurcissait totalement les différentes fibres testées pour une dose cumulée inférieure au kGy à température ambiante. Un second essai a eu lieu sur la plateforme Mega de l'ONERA, à Toulouse. Le plus faible débit de dose choisi, ainsi que la chauffe simultanée du CFO à haute température, ont permis de s'approcher des conditions environnementales sur site. Le retour d'expérience a montré que l'ARI était trop faible pour être quantifiée, à haute température, jusqu'à une dose cumulée de 0,2 kGy. Une nouvelle campagne d'irradiation est en préparation et permettra d'atteindre la dose de 20 kGy.

3.2. Caractérisation de diélectriques pour le solaire photovoltaïque

L'objectif de cette étude est de développer une nouvelle technique de caractérisation des charges piégées dans les matériaux diélectriques de passivation déposés en couche mince à la surface des cellules photovoltaïques. Les couches minces diélectriques sont couramment utilisées dans la fabrication des cellules photovoltaïques en silicium cristallin. Ces couches ont pour finalité d'augmenter le rendement de conversion de la cellule en réduisant l'activité recombinante des défauts présents en surface du silicium. Le but recherché via l'étape de passivation est d'augmenter la collecte des porteurs photogénérés par le rayonnement incident dans le silicium en améliorant leur durée de vie. Au laboratoire PROMES-CNRS, les couches minces diélectriques (nitrure ou carbure de silicium, oxyde de silicium hydrogéné SiCN:H) sont déposées sur les faces avant et/ou arrière des cellules photovoltaïques grâce aux techniques de dépôt chimique assisté par plasma. Elles permettent de supprimer les défauts de surface du silicium, soit en réduisant la densité d'état d'interface (en saturant chimiquement les liaisons pendantes), soit en repoussant les porteurs (électrons ou trous) loin de la surface par effet de champ. Dans cette étude, nous nous concentrons sur ce deuxième phénomène. L'effet de champ est induit par la présence de défauts de structure à l'origine de charges fixes positives ou négatives. Cet effet de champ est nécessaire afin d'atteindre de meilleurs rendements photovoltaïques. Nous proposons d'utiliser la Méthode de l'Onde Thermique (MOT). Cette méthode est non destructive, présente la particularité de détecter des charges en volume et consiste à mesurer et à analyser un courant capacitif engendré par la propagation d'une onde de température dans le matériau à caractériser.

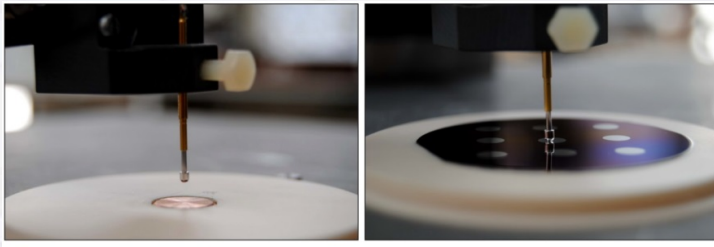


Figure 6 : La pastille de cuivre du radiateur thermique et la pointe conductrice (à gauche) et un échantillon posé sur le radiateur (à droite).

Les résultats obtenus sont confrontés à des mesures C-V. Pour cela, une électrode métallique est déposée sur la couche diélectrique, une structure Métal-Isolant-Semi-conducteur (MIS) est alors obtenue (Figure 6). Les premiers résultats obtenus sont encourageants et tendent à démontrer la pertinence de cette approche méthodologique pour la caractérisation de diélectriques.