

Gestion « intelligente » de bâtiments basse consommation en région Occitanie

Smart management of low-energy buildings in Occitania

Directeur de thèse : Stéphane Grieu, professeur des universités, PROMES-CNRS, grieu@univ-perp.fr

Co-directeur : Julien Eynard, maître de conférences, PROMES-CNRS, julien.eynard@univ-perp.fr

Co-encadrant : Stéphane Thil, maître de conférences, PROMES-CNRS, stephane.thil@univ-perp.fr

Mots-clés : bâtiments basse consommation, intelligence artificielle (apprentissage automatique), commande prédictive, optimisation. **Keywords**: low-energy buildings, artificial intelligence (machine learning), model-based predictive control, optimisation.

Modalité d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant

Le doctorant sera accueilli au sein de l'équipe COSMIC (Commande des Systèmes, Instrumentation, Caractérisation) du laboratoire PROMES (UPR CNRS 8521). PROMES est rattaché à l'INSIS (Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes) et conventionné avec l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). Le laboratoire fédère les compétences de chercheurs et enseignants-chercheurs autour de l'énergie solaire et de sa valorisation. Ses activités, pluridisciplinaires, couvrent un large spectre : du matériau jusqu'au réseau d'énergie (thermique/électrique). Un comité de suivi individuel (CSI) vérifiera chaque année la bonne avancée des travaux et autorisera la réinscription du doctorant. Ce dernier complètera sa formation grâce aux différents modules proposés par l'école doctorale ED 305 « Energie et environnement ».

Présentation détaillée du projet doctoral

Le présent projet de thèse fait suite aux travaux menés par l'équipe COSMIC en matière de gestion des ressources dans le bâtiment – ces travaux ont principalement été menés en simulation – et traite du développement puis de la validation *in situ* d'algorithmes « intelligents » pour la gestion prédictive et conjointe des installations et systèmes équipant plusieurs bâtiments basse consommation, identifiés par PROMES-CNRS et Roussillon Aménagement près de Perpignan : un bâtiment résidentiel collectif, un bâtiment industriel et un bâtiment tertiaire.

- Le bâtiment résidentiel collectif regroupe des habitations qui mutualisent une production solaire photovoltaïque et une production solaire thermique. Des systèmes de stockage (des batteries et un ballon d'eau chaude collectif) équipent le bâtiment.
- Le bâtiment industriel est dédié à la vinification et à l'embouteillage d'une production locale de vin. La production de chaleur industrielle est ici assurée par une installation solaire thermique et un appoint électrique, associé à un système de stockage thermique.
- Le bâtiment tertiaire (des bureaux) est équipé de panneaux solaires photovoltaïques et thermiques.

Habituellement, une stratégie fondée sur une concaténation de règles logiques est utilisée pour la gestion des installations et systèmes équipant les bâtiments basse consommation. Cette solution, bien qu'offrant des avantages, peine à traiter avec efficacité les différentes situations rencontrées, rendues complexes par la pluralité des comportements énergétiques dans le bâtiment et la variabilité de la ressource solaire. Les travaux confiés au doctorant seront organisés comme suit.

- Dans un premier temps, le doctorant étudiera les modes de consommation de l'énergie, selon l'usage des bâtiments et les particularismes régionaux – ces bâtiments sont instrumentés (un état des lieux est en cours) –, à partir des données collectées *in situ*. Ces données permettront le développement de scénarios (définissant les conditions initiales de fonctionnement de la structure de commande) et de modèles de prévision de la consommation énergétique, à horizon de temps infra-journalier, grâce aux outils du traitement du signal et de l'intelligence artificielle. Des critères seront proposés pour l'évaluation du confort thermique des occupants et usagers.

- Le doctorant développera par ailleurs des modèles de prévision de la ressource solaire, à des fins de prévision de la production locale. Ces modèles s’appuieront sur les travaux menés par PROMES-CNRS : des modèles de régression gaussienne ont été développés pour la prévision multi-horizon de l’éclairement global horizontal. Les installations solaires seront modélisées.
- Faisant suite aux travaux présentés ci-avant, le doctorant se verra confier le développement d’algorithmes pour la gestion prédictive et conjointe des équipements, en particulier des systèmes de stockage. Dans l’optique d’une réduction de la facture énergétique, un superviseur, fondé sur la théorie de la commande prédictive – le modèle de commande sera obtenu à partir de mesures réalisées *in situ* –, optimisera le pilotage des systèmes de CVC. L’autoconsommation sera favorisée, limitant de fait la dépendance des bâtiments au réseau électrique de distribution. Cette structure de commande hiérarchisée – les contrôleurs locaux seront supervisés –, capable de s’adapter à l’usage des bâtiments, mettra à profit l’interopérabilité des équipements, dans certains cas mutualisés. Elle permettra la résolution en temps réel d’un problème d’optimisation contraint par le nécessaire confort thermique des occupants et usagers.
- Les algorithmes développés et testés en simulation feront l’objet d’une implémentation au sein d’un système embarqué et seront validés *in situ*, en conditions réelles de fonctionnement, donnant lieu à la réalisation d’un démonstrateur. Le coût calculatoire de ces algorithmes sera minimisé.

Thesis detailed overview

The present PhD thesis is linked to COSMIC’s research activities that deal with energy resources management in buildings – to date, these research activities have been carried out in simulation – and focuses on the development and on-site validation of smart algorithms dedicated to the predictive and jointly management of installations and systems that equip several low-energy buildings chosen by PROMES-CNRS and Roussillon Aménagement in the area of Perpignan: a collective residential building, an industrial building and a non-residential building.

- In the collective residential building, photovoltaic power generation and thermal solar generation are shared. Storage systems (batteries and a collective hot water tank) equip the building.
- The industrial building is dedicated to wine production and bottling. Thermal solar panels enable industrial heat production. A thermal storage system equips the building.
- The non-residential building (offices) is equipped with photovoltaic and thermal solar panels.

Usually, a strategy based on aggregating logical rules is used to manage installations and systems that equip low-energy buildings. Although offering advantages, such a solution struggles to efficiently deal with all the situations, due to the complexity and variety of energy behaviours in buildings as well as the solar resource variability. The work will be organized as follows.

- First, the PhD student will study the energy consumption behaviours, according to building uses and local characteristics – these buildings are instrumented (an inventory is currently being performed) –, based on data collected on site. These data will be used to develop scenarios (that will define the control architecture initial conditions) as well as intra-hour forecasting models of energy consumption, thanks to signal processing and artificial intelligence tools. Criteria will be formulated to evaluate the thermal comfort of occupants and end-users.
- Moreover, the PhD student will develop models for solar resource forecasting, enabling local energy production to be forecasted. Such models will be based on previous works carried out by PROMES-CNRS: Gaussian regression models have been developed for multi-horizon forecasting of global horizontal irradiance. The solar installations will be modelled.
- Following the above-mentioned works, the PhD student will develop algorithms dedicated to the predictive and jointly management of the considered systems, in particular storage systems. With a view to reducing the energy bill, a supervisor based on the model-based predictive control theory – the internal model will be developed from data collected on-site – will optimize the HVAC (heating, ventilation and air-conditioning) systems management. Self-consumption of energy will

be promoted, enabling the buildings' dependence to the grid to be minimized. This hierarchical control architecture – local controllers will be supervised –, capable of adapting to various building uses, will take advantage of system interoperability and, in some cases, system sharing. It will enable to solve in real time a thermal-comfort constrained optimisation problem.

- The developed and tested in simulation algorithms will be implemented in an embedded system will be validated on site, in real operating conditions, leading to a demonstrator. These algorithms will be computationally tractable.

Objectif

Inspiré de la révolution numérique, le bâtiment intelligent – un bâtiment basse consommation, voire à énergie positive, qui interagit avec son environnement – est l'une des clés d'une transition énergétique réussie. C'est pourquoi le laboratoire PROMES-CNRS (PROcédés, Matériaux et Energie Solaire) et Roussillon Aménagement, un acteur local investi dans l'aménagement de parcs d'activités économiques et dans la construction d'habitats urbains et périurbains, collaborent au développement d'algorithmes « intelligents » – ces algorithmes s'appuient sur les outils de l'intelligence artificielle – pour la gestion prédictive des installations et systèmes équipant le bâtiment de demain (Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC), production locale d'énergie, stockage thermique/électrique). Ainsi, le projet de thèse contribuera à l'efficacité énergétique de ce bâtiment, qu'il soit résidentiel, industriel ou tertiaire, et favorisera l'autoconsommation (limitant de fait sa dépendance au réseau électrique de distribution), tout en garantissant le confort thermique des occupants et usagers.

Contexte

En région Occitanie, le secteur du bâtiment est à l'origine de près de 50 % de la consommation énergétique et d'environ un quart des émissions de gaz à effet de serre. Le scénario REPOS (Région à Energie POSitive), qui ambitionne de faire de l'Occitanie, à l'horizon 2050, un territoire à énergie positive, repose sur la construction de bâtiments basse consommation, voire à énergie positive, et sur la rénovation du bâti. Le bâtiment de demain sera équipé d'installations solaires photovoltaïques ou thermiques – ces installations induisent une production qui n'est généralement pas en phase avec la consommation – et de systèmes de stockage. Ceci requiert le développement d'algorithmes pour la gestion prédictive de ces installations et systèmes, favorisant l'autoconsommation, à des fins de réduction de la facture énergétique, tout en garantissant le confort thermique des occupants et usagers. Plusieurs projets de recherche, succinctement présentés ci-après, ont impliqué PROMES-CNRS. Ils sont à l'origine des travaux proposés.

- Au cours du projet RIDER (« Réseau et Interconnectivité Des Energies Renouvelables »), PROMES-CNRS et IBM France ont développé une approche méthodologique pour la modélisation thermique simplifiée de bâtiments tertiaires.
- Au cours du projet Batnrj – la solution éponyme permet le suivi en temps réel des performances énergétiques et de confort thermique des bâtiments qu'elle équipe –, PROMES-CNRS et Pyrescom (« Pyrénées, réseaux, communications ») ont développé et testé en simulation des algorithmes, à faible coût calculatoire, destinés à être implémentés au sein d'un système embarqué, à des fins de gestion prédictive des systèmes de CVC équipant les bâtiments tertiaires. Des contraintes de confort thermique ont été définies.
- Enfin, une thèse a porté sur la gestion prédictive, en simulation, d'un bâtiment résidentiel équipé de panneaux solaires photovoltaïques, d'une micro-éolienne à axe vertical et de batteries.

Résultats attendus

Sont attendus comme résultats du projet doctoral, dans un premier temps, des scénarios et des modèles de prévision de la consommation énergétique, à horizon de temps infra-journalier. Des critères seront proposés pour l'évaluation du confort thermique des occupants et usagers. Des modèles de prévision de la ressource solaire seront développés, à des fins de prévision de la production locale. Les installations solaires seront modélisées. Des algorithmes pour la gestion prédictive et

conjointe des équipements, en particulier des systèmes de stockage, seront développés. Les algorithmes développés et testés en simulation feront l'objet d'une implémentation au sein d'un système embarqué et seront validés *in situ*, en conditions réelles de fonctionnement, donnant lieu à la réalisation d'un démonstrateur.

Références bibliographiques

- [1] Aurélie Chabaud, Julien Eynard et Stéphane Grieu, *A rule-based strategy to the predictive management of a grid-connected residential building in southern France*, Sustainable Cities and Society 30 (2017) 18-36.
- [2] Antoine Garnier, Julien Eynard, Matthieu Caussanel et Stéphane Grieu, *Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings*, Applied Soft Computing 37 (2015) 847-862.
- [3] Aurélie Chabaud, Julien Eynard et Stéphane Grieu, *A new approach to energy resources management in a grid-connected building equipped with production and storage systems: A case study in the south of France*, Energy and Buildings 99 (2015) 9-31.
- [4] Antoine Garnier, Julien Eynard, Matthieu Caussanel et Stéphane Grieu, *Low computational cost technique for predictive management of thermal comfort in non-residential buildings*, Journal of Process Control 24 (6) (Energy Efficient Buildings Special Issue) (2014) 750-762.
- [5] Antoine Garnier, Julien Eynard, Matthieu Caussanel et Stéphane Grieu, *Predictive control of multizone HVAC systems in non-residential buildings*, IFAC Proceedings Volumes 47 (3) (2014) 12080-12085.
- [6] Michaël Salvador et Stéphane Grieu, *Methodology for the design of energy production and storage systems in buildings: minimization of the energy impact on the electricity grid*, Energy and Buildings 47 (2012) 659-673.
- [7] Benjamin Paris, Julien Eynard, Stéphane Grieu et Monique Polit, *Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings*, Applied Soft Computing 11 (8) (2011) 5068-5080.
- [8] Benjamin Paris, Julien Eynard, Stéphane Grieu, Thierry Talbert et Monique Polit, *Heating controls for energy management in buildings*, Energy and Buildings 42 (10) (2010) 1908-1917.

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

L'équipe COSMIC du laboratoire PROMES-CNRS accueillera le doctorant. PROMES-CNRS dispose des ressources matérielles et logicielles nécessaires à la bonne avancée des travaux qui lui seront confiés. Par ailleurs, Roussillon Aménagement, partenaire du projet, cofinance le projet de recherche et met à disposition plusieurs bâtiments basse consommation : un bâtiment résidentiel collectif, un bâtiment industriel et un bâtiment tertiaire. Enfin, l'équipe COSMIC du laboratoire PROMES-CNRS financera, sur ses fonds propres, la valorisation des résultats obtenus, en particulier la participation à des conférences nationales et internationales.

Ouverture internationale

Le présent projet de thèse, qui aborde le développement d'algorithmes pour la gestion « intelligente » de bâtiments basse consommation en région Occitanie, doit contribuer au scénario REPOS (Région à Energie POSitive), qui ambitionne de faire de l'Occitanie, à l'horizon 2050, un territoire à énergie positive. Ces algorithmes favoriseront l'autoconsommation, à des fins de réduction de la facture énergétique, tout en garantissant le confort thermique des occupants et usagers. Le bâtiment étant un (très) gros consommateur d'énergie et à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre, mieux gérer ses ressources et influencer sur les modes de consommation est un enjeu planétaire.

Collaborations envisagées

Le présent projet de thèse permet à PROMES-CNRS et Roussillon Aménagement, un acteur local investi dans l'aménagement de parcs d'activités économiques et dans la construction d'habitats

urbains et périurbains, de collaborer au développement d'algorithmes pour la gestion « intelligente » de bâtiments basse consommation en région Occitanie, près de Perpignan. Roussillon Aménagement est une société d'économie mixte, maître d'ouvrage de nombreux projets dans les Pyrénées-Orientales. La PME/PMI Pyrescom (« Pyrénées, Réseaux, Communications » ; www.pyres.com), spécialiste de l'instrumentation pour le bâtiment et qui commercialise la solution « Batnrj » (PROMES-CNRS a contribué au développement de cette solution par l'intermédiaire du dispositif CIFRE), a été contactée. Elle pourra, si nécessaire, contribuer à l'instrumentation des bâtiments considérés. Un état des lieux en la matière est en cours (PROMES-CNRS et Roussillon Aménagement).

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle, ...

Les résultats obtenus seront valorisés par l'intermédiaire, d'une part, de communications dans des congrès nationaux et internationaux et, d'autre part, de publications dans des revues internationales à comité de lecture. Le cas échéant, le droit à la propriété intellectuelle des algorithmes développés pourra être protégé.

Profil et compétences recherchées

Etre titulaire d'un master ou d'un diplôme d'ingénieur. Des compétences en automatique avancée (en particulier en commande prédictive), intelligence artificielle (apprentissage automatique), modélisation et identification des systèmes et programmation scientifique (Matlab) sont recherchées. Un bon niveau en anglais est exigé.

Profile

Master's or engineering degree. Skills in advanced automatic control (in particular regarding model-based predictive control), artificial intelligence (machine learning), system identification and modelling and scientific programming (Matlab) are sought. Excellent skills in English language are required.