

Gestion « intelligente » d'installations associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation (SmartECS)

Smart management of combined electric water heaters and self-consumption photovoltaic solar panels (SmartECS)

Julien Eynard (julien.eynard@univ-perp.fr) et Stéphane Grieu (grieu@univ-perp.fr)
Laboratoire PROMES-CNRS, rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan
Université de Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan

Résumé

Alors que le secteur du bâtiment se montre de plus en plus économe en énergie, les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) augmentent, en particulier dans les logements récents. De ce fait, il apparaît nécessaire d'améliorer l'efficacité des solutions mises en œuvre pour la production d'ECS, de mieux comprendre les besoins en ECS et d'impliquer l'utilisateur dans la prise de décision. Le projet traite du développement d'algorithmes pour le contrôle/commande « intelligent » d'installations associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation. Sera mise en œuvre une stratégie fondée sur la théorie de la commande prédictive, mettant à profit les outils de l'apprentissage automatique. Cette stratégie sera généralisée aux systèmes « multi-chauffe-eau », mutualisant une production solaire photovoltaïque, par le développement d'une commande distribuée et hiérarchisée. Une expérimentation permettra d'évaluer les conditions d'acceptabilité de la solution développée et l'impact de l'information sur la prise de décision.

Abstract

While the building sector is increasingly energy efficient, the need for domestic hot water (DHW) is increasing, especially in newer homes. Therefore, improvement of efficiency in the production of DHW, a better understanding of the needs in DHW, and user involvement in the decision-making process are necessary. The project deals with the development of algorithms for the smart control of combined electric water heaters and self-consumption photovoltaic solar panels. A model-based predictive control strategy will be developed and implemented, leveraging machine learning tools. The strategy will be generalized to multi-water heater systems, sharing photovoltaic solar production, through the development of a distributed and hierarchical control approach. An experiment will make it possible to assess the conditions of acceptability of the developed solution and the impact of information on decision-making.

Mots-clés

Eau chaude sanitaire, chauffe-eau électrique, production solaire photovoltaïque, autoconsommation, intelligence artificielle, apprentissage automatique, commande prédictive, acceptabilité.

Keywords

Domestic hot water, electric water heater, self-consumption photovoltaic solar production, artificial intelligence, machine learning, model-based predictive control, acceptability.

Contexte

Le 27 novembre 2018, le gouvernement français a dévoilé la nouvelle Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE). L'objectif affiché est une réduction de 35 % de la consommation d'énergie fossile d'ici à 2028, par rapport à 2012, puis de 40 % en 2030. Après le secteur du transport, le bâtiment est le deuxième plus gros consommateur d'énergie fossile. Bien que la consommation électrique en lien avec la production d'eau chaude sanitaire dans les logements anciens soit plutôt faible, elle a tendance à augmenter dans les logements bien isolés thermiquement. Cette consommation est, notamment, dépendante du comportement des usagers et des performances des chauffe-eaux électriques. Par ailleurs, l'un des principaux objectifs fixés par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) est le

déploiement, dans les années à venir, de 65 000 à 100 000 installations solaires photovoltaïques en autoconsommation. Les régions ont un rôle à jouer dans la mise en œuvre de la stratégie nationale. Ainsi, la région Occitanie a adopté un plan d'action afin d'atteindre ses objectifs : devenir, à l'horizon 2050, la première région française à énergie positive (scénario REPOS, pour Région à Energie POSitive). La région Occitanie a notamment ciblé le déploiement de l'autoconsommation d'électricité solaire photovoltaïque et défini, dans le cadre de sa Stratégie Régionale de l'Innovation (SRI), sept domaines de « spécialisation intelligente », parmi lesquels « Transition énergétique : du développement des énergies renouvelables aux mutations industrielles » et « Systèmes intelligents et chaîne de la donnée numérique ». Le projet de recherche s'inscrit tant dans la feuille de route de la nouvelle PPE que dans la stratégie d'innovation de la région Occitanie.

Dans le secteur du bâtiment, le déploiement des technologies vertes fait face à de nombreux verrous scientifiques et techniques en lien, principalement, avec les usages de l'énergie et l'intermittence de la ressource énergétique renouvelable. La révolution numérique, en particulier le déploiement de solutions fondées sur les outils de l'intelligence artificielle ou du contrôle/commande avancé, pourrait contribuer à lever certains de ces verrous. En effet, il est possible, grâce à ces outils, de piloter la consommation énergétique en lien avec les usages – de nature stochastique –, de décider du stockage (et du déstockage) de l'énergie, selon la disponibilité de la ressource énergétique renouvelable ou des contraintes en matière de confort, en particulier thermique. Ces outils autorisent par ailleurs la prise en compte d'informations utiles à la prise de décision, fournies par l'utilisateur.

Depuis quelques années, le modèle économique le plus répandu pour ce qui est des installations solaires photovoltaïques domestiques est l'autoconsommation de la production électrique. Toutefois, bien souvent, le déphasage entre production et consommation tend à pénaliser la rentabilité de ces installations et, de fait, limite les économies possibles en lien avec le soutirage de l'électricité au réseau électrique de distribution.

Présentation du projet de recherche

Le projet de recherche SmartECS, au carrefour des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales, implique les laboratoires PROMES-CNRS (« PROcédés, Matériaux et Energie Solaire ») et ART-Dev (« Acteurs, Ressources, Territoires dans le DEveloppement). SmartECS, qui s'inscrit dans l'axe « Transition énergétique et développement durable » de la FREE de l'UPVD, traite du développement d'algorithmes, dont il conviendra de maîtriser le coût calculatoire, pour le contrôle/commande « intelligent » d'installations destinées aux logements individuels et collectifs associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation. Les travaux auront pour objectifs principaux de démontrer la pertinence du solaire photovoltaïque pour la production d'eau chaude sanitaire et qu'il est possible, grâce à une stratégie de commande adaptée, d'améliorer l'efficacité du système tout en répondant au mieux aux besoins des usagers en matière d'eau chaude sanitaire. Habituellement, les solutions commerciales embarquent des systèmes de régulation qui ne sont pas des plus adaptés à l'autoconsommation de l'électricité produite par des panneaux solaires photovoltaïques. Sera mise en œuvre une stratégie fondée sur la théorie de la commande prédictive, mettant à profit les outils de l'apprentissage automatique pour la prévision, à horizon de temps infra-journalier, de grandeurs stochastiques. Un banc d'essai, mis à disposition par la plateforme technologique EnRMAT (EnR : Matériaux/Applications solaires/Transfert), permettra de valider les algorithmes développés. Cette stratégie sera généralisée à un système « multi-chauffe-eau » par le développement d'une commande hiérarchisée et distribuée. Une expérimentation, menée auprès d'un panel représentatif d'usagers auquel Roussillon Habitat, une branche de l'Office Public de l'Habitat des Pyrénées-Orientales, permettra d'avoir accès, aura pour objectif d'évaluer, d'une part, les conditions d'acceptabilité, par l'utilisateur, de la solution logicielle développée par PROMES-CNRS et, d'autre part, l'influence de l'information sur la prise de décision.

Structuration du projet de recherche

Les travaux confiés au doctorant sont structurés par les trois activités succinctement présentées ci-après. Ces activités sont détaillées ci-après.

1. Développer une solution logicielle – des algorithmes dont il convient de maîtriser le coût calculatoire – pour le contrôle/commande « intelligent » d’installations, destinées aux logements individuels, associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation par la mise en œuvre d’une stratégie fondée sur la théorie de la commande prédictive. Valider cette stratégie, qui mettra à profit les outils de l’apprentissage automatique pour la prévision de grandeurs stochastiques, grâce au banc d’essai mis à disposition par la plateforme technologique EnRMAT. Les profils types de consommation d’eau chaude sanitaire définiront les conditions initiales de fonctionnement du système de commande.
2. Généraliser la stratégie susmentionnée aux systèmes « multi-chauffe-eau » – des logements collectifs équipés de chauffe-eaux électriques individuels mutualisant une production solaire photovoltaïque ; une clé de répartition sera définie – par le développement d’une commande hiérarchisée et distribuée.
3. Mener une expérimentation auprès d’un panel représentatif d’usagers – un questionnaire sera rédigé – permettant d’évaluer, d’une part, les conditions d’acceptabilité de la solution logicielle que développera PROMES-CNRS et, d’autre part, l’impact de l’information disponible sur la prise de décision.

Structuring of the research project

The work entrusted to the doctoral student is structured by the three activities briefly presented below. These activities are detailed below.

1. Develop a software solution – algorithms whose computational cost should be controlled – for the smart control of combined electric water heaters and self-consumption solar photovoltaic panels, intended for individual housing, by setting up a model-based predictive control strategy. Validate this strategy, which will make use of machine learning tools for forecasting stochastic quantities, using the test bench made available by the EnRMAT technological platform. Typical DHW consumption profiles will define the initial operating conditions of the control system.
2. Generalize the aforementioned control strategy to multi-water heater systems – collective housing, equipped with individual electric water heaters and sharing a solar photovoltaic production; a distribution key will be defined – by the development of a distributed/hierarchical control approach.
3. Carry out an experiment with a representative panel of users – a questionnaire will be drawn up – making it possible to assess, on the one hand, the conditions of acceptability of the software solution that PROMES-CNRS will develop and, on the other hand, the impact of the available information on the decision-making process.

Activité 1. Développement d’algorithmes pour le contrôle/commande intelligent d’installations associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation (PROMES-CNRS) [1-6]

Sera confié au doctorant le développement d’une solution logicielle pour le contrôle/commande intelligent d’installations associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation. Plutôt que d’être stockée dans des batteries, la production solaire photovoltaïque, en particulier lorsqu’elle est habituellement inutilisée, par exemple en milieu de journée, sera mise à profit pour la production d’ECS. Des algorithmes, fondés sur la théorie de la commande prédictive, dont il conviendra de maîtriser le coût calculatoire, seront développés par le doctorant afin de contrôler le déclenchement des charges électriques, conformément à la production solaire photovoltaïque (électrique), aux besoins en ECS, aux tarifs d’achat de l’électricité et à la consommation électrique à venir (Figure 1). Le doctorant développera un modèle du ballon d’eau chaude et des résistances électriques. Le modèle discrétisé, dans le temps et dans l’espace, sera validé grâce aux données expérimentales provenant du banc d’essai mis à disposition par la plateforme technologique EnRMAT (Figure 1), permettant de simuler des puisages d’eau chaude. La prévision par les outils de l’apprentissage automatique (voire de l’apprentissage profond), à horizon de temps infra-journalier, de la production solaire photovoltaïque, des besoins en eau chaude sanitaire d’un logement individuel

et de la consommation électrique est un élément clé de la stratégie de gestion prédictive proposée par PROMES-CNRS. Le choix des outils susmentionnés s'explique, d'une part, par leur adéquation avec la prévision des séries temporelles et, d'autre part, par leur importante capacité de généralisation, mise à profit dans l'optique d'un système de commande autoapprenant. Le doctorant veillera à la maîtrise du coût calculatoire des différents algorithmes développés et, de fait, à leur adéquation avec les contraintes du temps réel. Définir un jeu de profils types de consommation d'eau chaude sanitaire, pour un système de commande fonctionnel dès son installation sur site – ces profils types serviront de conditions initiales de fonctionnement du système de commande –, est rendu nécessaire par le choix des outils de l'apprentissage automatique pour la prévision des différentes grandeurs stochastiques susmentionnées. Le développement d'algorithmes efficient, grâce à ces outils, est en effet contraint par la disponibilité de données consolidées, nécessaire à la réalisation d'un apprentissage efficient. Le doctorant pourra s'appuyer sur les travaux menés par le premier des deux stagiaires financés par la FREE.

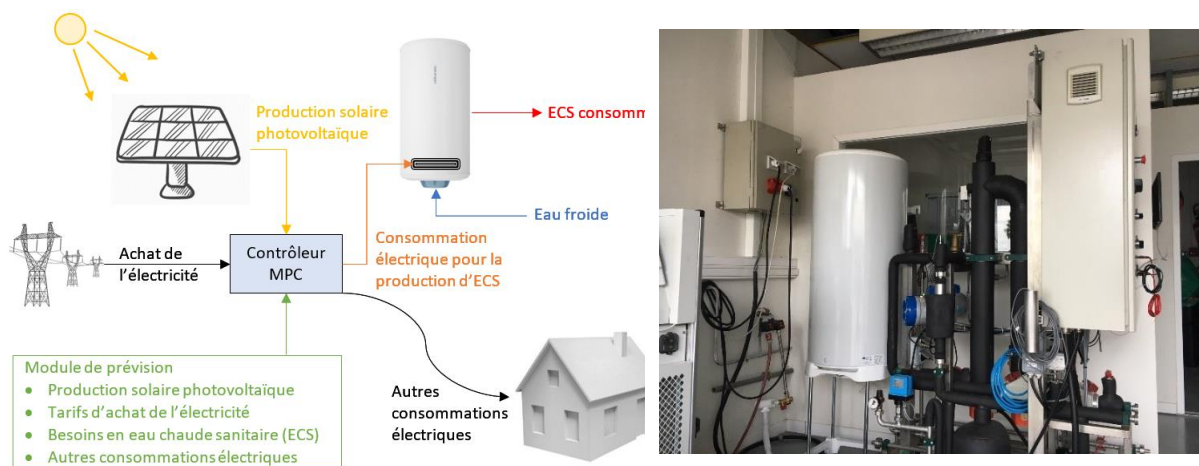


Figure 1. Gauche : synoptique de la stratégie de contrôle/commande proposée par PROMES-CNRS pour la production d'eau chaude sanitaire dans les logements individuels. Droite : le banc d'essai instrumenté mis à disposition par la plateforme technologique EnRMAT.

La stratégie mise en œuvre devra améliorer l'efficacité énergétique de l'installation, maximiser le gain économique associé à l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques et tirer profit de la tarification heures creuses/heures pleines. Le taux d'autoconsommation de la production solaire photovoltaïque sera maximisé, les besoins en eau chaude sanitaire devront être satisfaits, garantissant un bon confort d'usage. Les résultats obtenus au cours du projet de recherche pourraient par ailleurs contribuer à l'évolution des pratiques aujourd'hui observées en matière de dimensionnement des installations solaires photovoltaïques et privilégier l'augmentation des capacités installées, avec comme perspective de répondre au mieux aux besoins électriques des logements, qu'ils soient individuels ou collectifs. Enfin, le projet devra démontrer la pertinence d'une production solaire photovoltaïque autoconsommée pour répondre aux besoins en eau chaude sanitaire, dans un premier temps, des logements individuels, dans un deuxième temps, des logements collectifs.

Activité 2. Généralisation de la stratégie à un système « multi-chauffe-eau » par le développement d'une commande hiérarchisée et distribuée (PROMES-CNRS) [1-6]

Suite au développement et à la validation, grâce au banc d'essai instrumenté (Figure 1) mis à disposition par la plateforme technologique EnRMAT, d'algorithmes pour le contrôle/commande intelligent d'installations associant chauffe-eau électrique et panneaux solaires photovoltaïques en autoconsommation destinés aux logements individuels, la stratégie mise en œuvre sera généralisée à des systèmes « multi-chauffe-eau », à savoir des logements collectifs équipés de chauffe-eaux électriques individuels et mutualisant une production solaire photovoltaïque.

Cette généralisation, rendue possible par le logement collectif auquel il sera possible d’avoir accès grâce à Roussillon Habitat, partenaire du projet de recherche, est fondée sur le développement d’algorithmes permettant la mise en œuvre d’une commande hiérarchisée et distribuée, la définition d’une clé de répartition (de la production solaire photovoltaïque) et la prévision à horizon de temps infra-journalier des besoins individuels en ECS et de la production solaire photovoltaïque. Un modèle du système « multi-chauffe-eau » sera développé grâce aux données collectées sur site par Roussillon Habitat. Les contrôleurs MPC équipant les chauffe-eaux électriques individuels communiqueront au répartiteur des prévisions de consommation électrique. Ainsi, sur la base de ces prévisions, le répartiteur décidera, à chaque pas de temps, sur l’horizon de temps considéré, de la répartition entre les logements de la production solaire photovoltaïque (Figure 2). La commande hiérarchisée et distribuée mise en œuvre par PROMES-CNRS aura pour objectif de satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire et d’exploiter au mieux la production solaire photovoltaïque mutualisée afin de limiter son injection sur le réseau électrique de distribution.

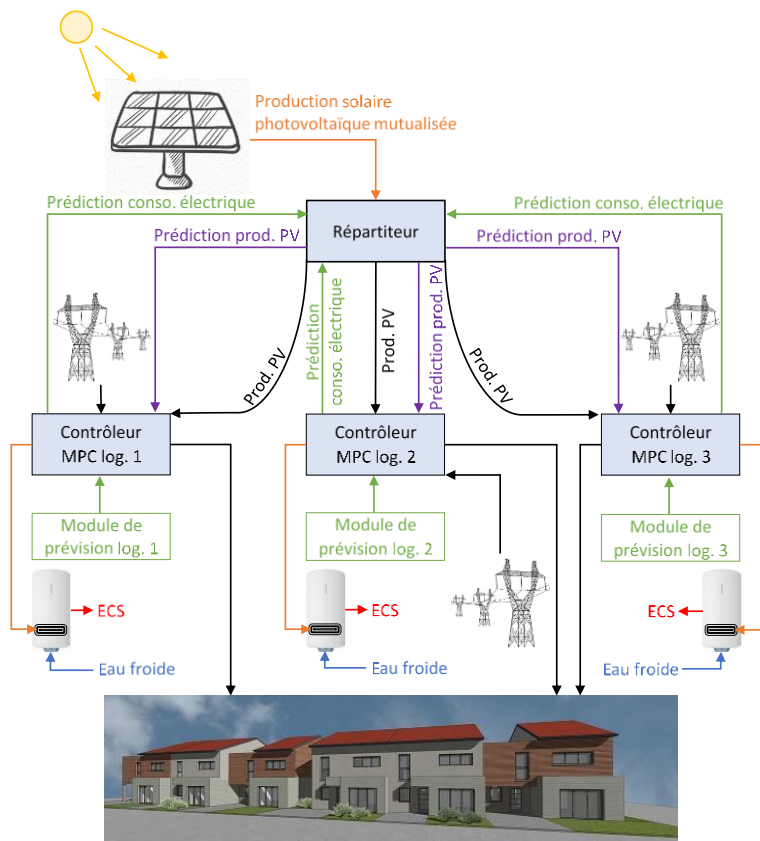


Figure 2. Structure de la commande hiérarchisée et distribuée proposée par PROMES-CNRS pour la production d’eau chaude sanitaire dans les logements collectifs (trois logements représentés).

Activité 3. Expérimentation menée auprès d’un panel représentatif d’usagers (ART-Dev) [7-10]

Les solutions logicielles dites « intelligentes » soulèvent de nombreuses questions quant à leur adoption par le consommateur et quant à leur appropriation par l’usager, ce qui influe, notamment, sur la capacité de ce dernier à fournir des informations utiles à la prise de décision – par le système de commande, dans le cas de la solution que développera PROMES-CNRS –, contribuant, par conséquent, à l’efficacité de ces solutions. La question de leur bonne utilisation se pose également : une interface conviviale et facile d’accès favorise l’appropriation, tout comme des connaissances préalables. Ainsi, analyser le comportement de l’usager apparaît fondamental dès lors qu’il s’agit de lever les biais cognitifs face à l’utilisation des technologies de l’information et de la communication. La littérature sur ce sujet est plutôt riche, en particulier pour ce qui est des principaux déterminants dans le comportement de l’usager, toutefois peu d’articles traitent de l’adoption (donc, de fait, des conditions

d'acceptabilité) par ce dernier de solutions logicielles « intelligentes » telle que celle que PROMES-CNRS a l'ambition de développer au cours du projet de recherche. L'utilisateur a ainsi un rôle central à jouer dans l'optique d'une solution efficace, répondant aux besoins, notamment par sa capacité à fournir des informations utiles à la prise de décision (par le système de commande).

Par ailleurs, l'influence, d'une part, des informations reçues – ces informations, possiblement asymétriques, proviennent de sources diverses – et, d'autre part, de connaissances préalables (plus ou moins étendues) sur les choix du consommateur, qui fait habituellement face à plusieurs alternatives, souvent changeantes, en particulier du fait de solutions technologiques en constante évolution, voire à une importante pression concurrentielle, sera évaluée. De plus, l'asymétrie d'information peut conduire à l'absence de certitude, chez le consommateur, quant aux performances des différentes solutions disponibles. Sera également étudié le comportement de l'utilisateur en matière de consommation énergétique et son évolution possible, par exemple après une séquence d'utilisation, ou du fait de connaissances préalables (plus ou moins étendues) susceptibles d'influer sur ce comportement.

Le doctorant traitera ces questions, dans le cadre du projet, par le biais d'une expérimentation qui sera menée auprès d'un panel représentatif de ménages (de consommateurs et d'utilisateurs) auquel il sera possible d'avoir accès grâce à Roussillon Habitat. Un logement collectif sera sélectionné par ART-Dev, PROMES-CNRS et Roussillon Habitat, permettant à la fois de généraliser la stratégie proposée à un système « multi-chauffe-eau » et de mener cette expérimentation. Ainsi, le doctorant contribuera à la rédaction d'un questionnaire ayant pour objectif d'évaluer, notamment, le poids de l'information dans le comportement de l'utilisateur et les informations que ce dernier est prêt à fournir afin de contribuer à l'efficacité du système de commande. L'expérimentation permettra d'identifier les informations les plus pertinentes pour une prise de décision efficace, par le système de commande que développera PROMES-CNRS, dans un contexte de sobriété énergétique. L'influence des informations transmises par l'utilisateur sur la capacité du système à répondre aux besoins en ECS, tout en maximisant l'autoconsommation, sera évaluée, à l'aune d'un système capable de fonctionner, en mode dégradé, dès lors que ces informations ne sont pas disponibles.

Laboratoire d'accueil

PROMES-CNRS est une Unité Propre de Recherche (UPR 8521) rattachée à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) et conventionnée avec l'UPVD. Le laboratoire, qui est structuré en huit équipes de recherche, parmi lesquelles l'équipe COSMIC (pour « COmmande des Systèmes, Instrumentation, Caractérisation »), 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 et sont structurées selon deux axes thématiques : « matériaux et conditions extrêmes » et « conversion, stockage et transport de l'énergie ».

Les enseignants-chercheurs UPVD membres de l'équipe dépendent des sections 61 (« Génie informatique, automatique et traitement du signal »), 62 (« Energétique, génie des procédés ») et 63 (« Génie électrique, électronique, photonique et systèmes ») du Conseil National des Universités.

Les activités de COSMIC traitent, notamment, du contrôle/commande des systèmes impliquant l'énergie solaire : les centrales solaires photovoltaïques et thermodynamiques, possiblement équipées de systèmes de stockage, et les réseaux et micro-réseaux thermiques/électriques. La performance énergétique des bâtiments (très) basse consommation – un important vecteur de valorisation des technologies solaires – et la gestion de la production décentralisée, qui affecte la stabilité du réseau électrique de distribution (moyenne tension/basse tension) et, de fait, la distribution de l'énergie électrique, sont au cœur de ces activités. L'équipe développe des algorithmes à coût calculatoire maîtrisé, fondés sur les outils de l'automatique avancée et de l'intelligence artificielle, en particulier les outils de l'apprentissage automatique (ou *machine learning*). Une activité transversale, essentielle à la gestion (prédictive) des systèmes susmentionnés, traite de la prévision dans le temps et l'espace de la ressource solaire.

Bibliographie

[1] M. Roux, M. Apperley, M. J. Booyen, *Comfort, peak load and energy: Centralised control of water heaters for demand-driven prioritisation*, Energy for Sustainable Development 44 (2018) 78-86.

- [2] S. Gerber, A. J. Rix, M. J. Booysen, *Combining grid-tied PV and intelligent water heater control to reduce the energy costs at schools in South Africa*, Energy for Sustainable Development 50 (2019) 117-125.
- [3] A. Moreau, *Control strategy for domestic water heaters during peak periods and its impact on the demand for electricity*, Energy Procedia 12 (2011) 1074-1082.
- [4] F. Najafi, M. Fripp, *Stochastic optimization of comfort-centered model of electrical water heater using mixed integer linear programming*, Sustainable Energy Technologies and Assessments 42 (2020) 100834.
- [5] P. Kepplinger, G. Huber, J. Petrasch, *Autonomous optimal control for demand side management with resistive domestic hot water heaters using linear optimization*, Energy and Buildings 100 (2015) 50-55.
- [6] B. J. LaMeres, M. H. Nehrir, V. Gerez, *Controlling the average residential electric water heater power demand using fuzzy logic*, Electric Power Systems Research 52 (3) (1999) 267-271.
- [7] H. Allcott, N. Wozny, *Gasoline prices, fuel economy, and the energy paradox*, Review of Economics and Statistics 95 (5) (2014) 779-795.
- [8] J. Bettman, E. Johnson, J. Payne, *Consumers decision making*, Handbook of consumers, ed. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1991, pp. 50-79.
- [9] G. Lang, B. Lanz, *Energy efficiency, information, and the acceptability of rent increases: A multiple price list experiment with tenants*, IRENE Working paper 18-04, 2018.
- [10] J. P. Lévy, F. Belaïd, *The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 81(2) (2018) 2104-2114.