

Thèse de doctorat

Système non intrusif de désagrégation des usages électriques dans les bâtiments : auto-apprentissage et utilisation de capteurs sans-fil à faible coût

Laboratoire : INRIA/IRISA

<https://team.inria.fr/cairn>

Lieu : Lannion

Contacts : Olivier Sentieys <olivier.sentieys@inria.fr>, Baptiste Vrigneau <baptiste.vrigneau@irisa.fr>

Résumé

L'optimisation énergétique des bâtiments est devenue une priorité dans les constructions récentes comme dans les rénovations de l'ancien parc. Les TIC peuvent offrir une solution pour diminuer les consommations de plusieurs postes importants comme le chauffage, la ventilation, l'éclairage et le matériel électrique. Avant d'imaginer une action sur les usagers, il est essentiel de pouvoir identifier les appareils consommateurs à un instant donné. Une première solution consiste à relever la consommation de chaque appareil, ce qui est intrusif et inenvisageable à une grande échelle pour des raisons pratiques et de coûts. Une autre solution basée sur la désagrégation d'une consommation globale (NILM pour *Non-Intrusive appliance Load Monitoring*) est non intrusive mais doit pouvoir identifier les différents appareils. Notre projet est de mettre en œuvre une solution hybride non intrusive basée sur l'association de la consommation globale et d'un réseau de capteurs sans fil. Ce dernier collectera des informations diverses et variées comme la luminosité, la température, la présence mais aussi les vibrations ou des signatures acoustiques sous une forte contrainte d'autonomie. Les nœuds seront capables de récupérer l'énergie dans leur environnement et d'adapter leur activité afin d'atteindre une grande durée de vie. Ainsi, il faudra fournir une solution matérielle mais aussi logicielle avec les algorithmes associant le NILM et les capteurs, surtout pour surmonter la reconnaissance difficile des appareils à charge variable, par exemple les ordinateurs. De plus, ces capteurs devront pouvoir s'adapter à un nouvel environnement avec des solutions auto-apprenantes sur le nombre et le type d'appareils voire de nouveaux.

Contexte

La préservation des ressources naturelles est devenue maintenant une préoccupation majeure et a de ce fait motivé de nombreux efforts de recherche et de développement pour la gestion de l'énergie dans les bâtiments, immeubles et maisons individuelles. Réduire de façon efficace la consommation d'énergie à la maison, au travail ou dans les usines peut être obtenu en mixant différentes technologies pour non seulement réduire l'énergie consommée par les utilisateurs, mais aussi pour adapter l'énergie consommée à l'énergie produite. Dans [1], plusieurs opportunités de diminution de l'énergie et des émissions de gaz à effets de serre sont soulignées à partir d'un ensemble d'actions utilisant les technologies de l'information et de communications (TIC). Les bâtiments au sens large du terme représentent la part la plus significative de la consommation électrique globale. Les bâtiments intelligents (Smart Buildings), conjointement aux réseaux électriques intelligents (Smart Grid), ont donc le plus fort potentiel en termes de gain en énergie.

Le principal objectif est bien sûr de réduire la consommation d'énergie électrique des différents sous-systèmes dans un bâtiment. L'éclairage, les équipements informatiques, le chauffage, la climatisation et la ventilation représentent plus de 85% de la consommation électrique [2] [3] et l'effort doit donc être concentré sur ces sous-systèmes. Pour la gestion et la réduction de l'énergie dans les bâtiments, il est nécessaire de mesurer l'environnement (consommation électrique de chaque appareil ou équipement, température, activité des personnes, lumière, etc.) et de contrôler ces sous-systèmes (gérer la température d'une pièce, mettre en veille ou démarrer un équipement, gérer la ventilation ou la climatisation, réduire la lumière, etc.). Ceci représente le domaine émergent des bâtiments intelligents (Smart Building Automation).

La mesure non-intrusive de la consommation électrique d'équipements (NILM – *Non-Intrusive Appliance Load Monitoring*) [8] est un processus d'analyse des variations de la tension et du courant entrant dans un bâtiment ou une maison, afin d'en déduire quels sont les appareils utilisés ainsi que leur consommation d'énergie individuelle. Les compteurs électriques incluant la technologie NILM sont utilisés par les entreprises et les services publics pour étudier les usages spécifiques de l'électricité dans différents bâtiments. Les systèmes NILM sont considérés comme une alternative à faible coût au branchement de moniteurs individuels sur chaque appareil. Ces derniers sont intrusifs car ils nécessitent une mesure directe de la consommation électrique d'un équipement, ce qui

implique un coût unitaire, de déploiement et de maintenance important et qui limite donc leur utilisation massive tant dans les bâtiments commerciaux que dans les logements individuels.

Positionnement

Les systèmes NILM possèdent un grand intérêt, tant d'un point de vue purement scientifique (car il s'agit d'un problème non encore complètement résolu) [9-11], que d'un point de vue technologique. Ces systèmes ont également des retombées économiques très importantes, ainsi qu'un fort potentiel de maîtrise de l'énergie et donc un fort impact sur l'environnement. Ainsi, ils répondent à un vrai besoin du marché des bâtiments intelligents.

La thématique du NILM, un des axes de recherche abordés par l'équipe INRIA CAIRN [12] a pour objectif de pouvoir estimer les consommations (quels sont les appareils en fonctionnement) et l'activité humaine (présence et déplacements de personnes) dans un bâtiment de façon non intrusive, c'est à dire à partir d'une mesure unique et globale de l'énergie consommée et de données issues de capteurs à faible coût et faible consommation. Un compteur ou une prise électrique intelligent typique [6] est un équipement coûteux et nous étudions des capteurs intelligents à faible coût et non invasifs pour les remplacer. Les innovations majeures de nos travaux par rapport à l'état de l'art des techniques NILM sont d'une part la prise en compte de nombreuses données capteurs et du comportement des usagers, pour améliorer significativement les pourcentages de désagrégation de la consommation des équipements. Par exemple, pour mesurer la consommation électrique d'une télévision, il n'est pas nécessaire de mesurer précisément le courant électrique consommée. Un simple capteur capable de reconnaître si le téléviseur est allumé, éteint ou en veille fera le même travail avec une complexité bien plus faible [7]. Un autre exemple est qu'un capteur détectant l'activité humaine dans une pièce [5] permet de réguler la température, la ventilation, la climatisation, la lumière et même les équipements informatiques de celle-ci, ce qui peut réduire de façon significative la consommation électrique.

D'autre part, les algorithmes NILM doivent être paramétrés par la consommation des équipements. Notre objectif est d'aller vers des algorithmes NILM auto-apprenants, c'est à dire qui sont déployés sans connaissance a priori des équipements, et qui progressivement apprennent et améliorent leur estimation des consommations unitaires à partir d'une mesure globale unique, des données issues des capteurs et des résultats de cette analyse de données. Enfin, la possibilité que ces capteurs soient autoalimentés (i.e. sans batteries à remplacer ou sans accès à une alimentation électrique) et donc capables de récupérer leur énergie dans l'environnement est un point essentiel car cela facilite leur utilisation et leur déploiement dans des bâtiments existants ou en construction. Les systèmes actuels de mesure de l'énergie sont coûteux et encombrants et de tels systèmes fortement intégrés et à récupération d'énergie n'existent pas actuellement. Cette thèse vise à définir, étudier et prototyper des systèmes ayant ces caractéristiques.

Verrous

- Mettre au point des nœuds de capteur sans fil ultra-faible consommation, flexibles et capables de récupérer l'énergie dans l'environnement depuis plusieurs sources, ainsi que de nouvelles techniques de gestion de l'énergie pour adapter dynamiquement la charge de calcul à l'énergie disponible et à une estimation de ce qui peut être récupéré de l'environnement.
- Associer différents types de capteurs avec des algorithmes de traitement permettant de récolter de l'information pertinente sur l'état des appareils électriques, des occupants ou de la thermique des bâtiments par exemple et sous la contrainte d'énergie.
- Proposer de nouveaux algorithmes NILM auto-apprenants, pouvant être déployés sans connaissance a priori et estimant progressivement la consommation associée aux différents états des équipements.
- Mener le déploiement et le test d'un prototype réel de réseau de capteurs dans un bâtiment afin de valider les algorithmes NILM en conditions réelles et avec connaissance de la vérité de terrain.

Objectifs

Le premier objectif concerne l'ajout de données issues de réseaux de capteurs sans fil aux algorithmes de désagrégation de la consommation d'énergie dans un contexte de bâtiments intelligents. Dans une thèse débutée en 2013, nous proposons et développons de nouvelles techniques de mesures indirectes de l'énergie consommée dans un bâtiment [10]. Le problème de désagrégation consiste alors à, connaissant la mesure globale du courant électrique et des informations issues des capteurs, retrouver l'état (arrêté, en veille, en fonctionnement avec éventuellement plusieurs états de fonctionnement) et la consommation de chaque appareil électrique. Nous avons pu montrer que l'apport des données issues des capteurs permet d'améliorer de façon significative la qualité des résultats obtenus. Il reste cependant à étudier comment les capteurs peuvent ajouter des informations a priori sur

l'état des équipements et définir les algorithmes permettant d'estimer les probabilités de leur activité. Par exemple, l'intensité lumineuse donne une idée de la probabilité qu'une lumière soit allumée, les variations de température pour l'état du chauffage, ou des capteurs acoustiques peuvent déterminer les cycles opératoires d'une machine à laver ou d'autres équipements.

Les capteurs bas coût, faible consommation et ne posant pas de problème de vie privée pouvant être utilisés sont par exemple : lumière ambiante, température ambiante, température infra-rouge, humidité, baromètre, vibrations, mouvement 9 axes (accéléromètre, gyroscope, compas), magnétique, puissance acoustique, contacts (portes, fenêtres, etc.), ultra-son, etc. On peut aussi envisager d'utiliser des données environnementales telles que date, heure, météo, activités du réseau informatique, activités des machines, etc. Enfin, d'autres types de capteurs plus évolués peuvent être utilisés (caméra, micro, capteur de CO₂), mais ceux-ci peuvent soit poser des problèmes de vie privée ou de consommation trop importante.

Comme expliqué plus haut, un second objectif est de faire évoluer les algorithmes NILM vers des systèmes auto-apprenants, c'est à dire qui sont déployés sans connaissance a priori des équipements, et qui progressivement apprennent et améliorent leur estimation des consommations. Ceci peut être réalisé grâce à une phase d'apprentissage dans laquelle les états des équipements sont connus ou appris au cours du temps et où donc l'algorithme de désagrégation a maintenant pour objectif de déterminer la consommation associée aux états des équipements.

Finalement, un troisième objectif est de proposer des techniques de gestion et de réduction de l'énergie dans un nœud de capteur sans fil récupérant son énergie dans l'environnement (lumière intérieure, chaleur, vibrations) [12]. Un gestionnaire d'énergie adapte la qualité des algorithmes utilisés et donc leur consommation d'énergie et leur puissance de calcul, en fonction de l'énergie qu'il est possible de récupérer, ou à une prévision de celle-ci. Le principal avantage d'utiliser de la récupération d'énergie dans un contexte de bâtiment intelligent est d'éviter le remplacement des batteries et donc de réduire fortement le coût d'installation et d'entretien de ces capteurs. Un nœud ultra-faible consommation spécifique à ce contexte sera conçu et fabriqué, notamment les parties radio et traitement numérique seront optimisées. L'objectif est de montrer que la consommation peut être suffisamment réduite pour envisager une récupération d'énergie dans l'environnement à faible coût.

Profil du candidat (compétences scientifiques et techniques requises) : pour réaliser l'ensemble des travaux concernant cette thèse, le candidat devra principalement posséder de très bonnes connaissances en traitement du signal et en conception de systèmes numériques, notamment sous contrainte d'énergie.

Références

- [1] <http://www.smart2020.org/>
- [2] Y. Agarwal et al., Understanding the Role of Buildings in a Smart Microgrid, IEEE/ACM Conference on Design Automation and Test in Europe (DATE), March 2011.
- [3] Itron Inc. California Commercial End-Use Survey. <http://capabilities.itron.com/ceusweb>
- [4] Y. Agarwal et al., Somniloquy: Augmenting Network Interfaces to Reduce PC Energy Usage, USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI), April 2009.
- [5] Y. Agarwal et al., Occupancy-Driven Energy Management for Smart Building Automation, ACM BuildSys, November 2010.
- [6] X. Jiang, S. Dawson-Haggerty, P. Dutta and D. Culler, "Design and Implementation of a High-Fidelity AC Metering Network, Information Processing in Sensor Networks, 2009.
- [7] Y. Kim et al., "ViridiScope: Design and Implementation of a FineGrained Power Monitoring System for Homes", Proc. 11th Intl. Conf. on Ubiquitous Computing, 2009.
- [8] G.W.Hart, Non-intrusive appliance load monitoring, Proceedings of the IEEE, Vol.80, n°12, pp.1870-1891, 1992.
- [9] C. Laughman et al., Power signature analysis, IEEE Power and Energy Mag., vol. 1, n°2, Mar-Apr 2003, pp. 56- 63.
- [10] S.B.Leeb, S.R.Shaw and J.L. Jr .Kirtley, Transient event detection in spectral envelope estimates for nonintrusive load monitoring, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, n° 3, Jul 1995, pp.1200-1210.
- [11] K.D. Lee et al., Estimation of Variable-Speed-Drive Power Consumption From Harmonic Content, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, n°3, pp. 566- 574, Sept. 2005.
- [12] X.-C. Le, B. Vrigneau, O. Sentieys, L1-norm Minimization Based Algorithm for Non-Intrusive Load Monitoring, IEEE Workshop on Pervasive Energy Services, Co-located with the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication (PerCom), St. Louis, Missouri, USA, March 2015.
- [13] Trong Nhan Le, Alain Pegatoquet, Olivier Berder, Olivier Sentieys, Arnaud Carer, Energy Neutral Design Framework for Supercapacitor-based Autonomous Wireless Sensor Networks, ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems, Association for Computing Machinery, 2 (2), 2015.