

Préface

Dans ce troisième ouvrage, après [ROB 15] et [ROB 17], dernier opuscule de ce que l'on pourrait appeler un traité dédié au stockage de l'énergie électrique, le professeur Robyns et ses coauteurs démontrent qu'il est possible dès aujourd'hui d'envisager des solutions énergétiques responsables en matière d'environnement pour des applications liées aux bâtiments, qu'ils soient résidentiels et/ou tertiaires.

À l'instar de leurs précédents ouvrages, les auteurs s'appuient sur une méthodologie rigoureuse de conception de superviseurs à base de logique floue, méthodologie qui permet de gérer les flux énergétiques de façon optimale et ce, malgré de multiples contraintes hétérogènes.

La tâche est ardue, car les ambitions des auteurs ont crû avec le temps et l'expérience accumulée : il s'agit maintenant pour eux de proposer des solutions innovantes pour des systèmes extrêmement complexes puisque très interconnectés, et dans lesquels interagissent de multiples acteurs. Il en est ainsi des écoquartiers à la fois capables de s'autosuffire énergétiquement et en même temps capables d'agréger de nouveaux venus, sur un modèle *plug-and-play*, comme par exemple l'intégration harmonieuse de la recharge du parc de véhicules électriques et hybrides qui ne manquera pas de croître fortement dans les années à venir...

C'est pourquoi, et cela est rappelé avec justesse lors du chapitre d'introduction, il s'agit également de prendre en compte l'acceptabilité de ces nouvelles solutions énergétiques étant donné qu'elles toucheront tout un chacun au sein même de son propre foyer : la polémique actuelle sur la mise en place à large échelle des compteurs intelligents en est une illustration exemplaire.

Force est de constater qu'une fois encore les auteurs relèvent avec bonheur le défi : les qualités des ouvrages précédents se retrouvent dans celui-ci, à savoir une

présentation claire et pédagogique des enjeux, le tout émaillé d'exemples pertinents, tous traités avec rigueur et homogénéité méthodologique. Gageons que le lecteur intéressé par la question si importante pour notre société du changement de paradigme énergétique trouvera à la lecture de ce livre une source d'inspiration utile à ses propres travaux et à ses réflexions.

Éric MONMASSON
Laboratoire SATIE
Université de Cergy-Pontoise

Introduction

En France, en 2016, les bâtiments résidentiels et tertiaires représentaient 45 % de l'énergie finale totale consommée. La part de l'énergie électrique dans le mix énergétique est en progression constante et représente environ 37 % [MIN 17]. Il existe donc un enjeu important visant à accroître l'efficacité énergétique de ces bâtiments, et à les rendre producteurs et stockeurs d'énergie, en intégrant une gestion intelligente de l'énergie en interaction avec le réseau de distribution.

Actuellement, le développement des énergies renouvelables et la tendance à développer l'autoproduction et l'autoconsommation de l'énergie électrique produite localement donnent un nouvel intérêt pour le stockage de l'énergie électrique, qui devient un élément-clé du développement durable. L'autoconsommation incite à une meilleure maîtrise de l'énergie et permet une baisse de la facture d'électricité (baisse des coûts de raccordement au réseau électrique de distribution, de la puissance souscrite – donc de l'abonnement – et potentiellement des taxes facturées). Lorsqu'elle est collective, elle permet une meilleure optimisation en regroupant des bâtiments ayant des profils temporels de consommation différents. À ces gains potentiels s'ajoute la possibilité de valoriser l'effacement énergétique en modulant la consommation, en agissant sur des charges ou grâce à l'autoconsommation d'une production locale (avec ou sans système de stockage). Enfin, à ces gains financiers s'ajoutent des gains pour la collectivité lorsque l'énergie autoconsommée est d'origine renouvelable (ce qui est un objectif majeur de l'autoconsommation), car celle-ci est répartie en de multiples sites de production potentiels (en particulier le photovoltaïque en toiture), et consommer une énergie produite localement permet d'éviter ou de limiter les pertes induites par le transport de cette énergie sur de grandes distances.

Le développement important du vecteur électricité dans les bâtiments est dû à la souplesse d'utilisation de l'électricité, mais aussi à son caractère potentiellement non polluant sur le lieu d'usage. Les systèmes de stockage qui équiperont les bâtiments de façon croissante à l'avenir satisferont les besoins de ces applications (dont la fonction d'alimentation de secours), assureront la compensation des énergies renouvelables

intermittentes, mais offriront également des services à d'autres acteurs du système électrique. Les systèmes de stockage étant coûteux, ce pourrait être un moyen de mieux les valoriser financièrement, tout en intégrant la contrainte de maîtriser le vieillissement de ces systèmes. Des études sont menées afin d'évaluer la possibilité que le stockage des véhicules électriques puisse fournir des services au réseau de distribution de l'électricité, ou localement aux bâtiments auxquels ce stockage est connecté pour se recharger ; on parle alors de *Vehicle to Grid* (V2G) ou de *Vehicle to Home* (V2H). Il en est de même pour du stockage intégré à des bâtiments commerciaux, tertiaires (accueillant des bureaux) ou à des quartiers d'habitations.

Ce livre a pour but de contribuer à une meilleure connaissance du potentiel de ces technologies en développement dans le cadre des bâtiments, îlots de bâtiments, quartiers intégrés dans un large réseau électrique intelligent (dit *smart grid*) ou formant un microréseau électrique intelligent (dit *micro grid*), et tout particulièrement en ce qui concerne leur gestion et leur valorisation.

Le stockage sera une composante importante des futurs *smart grids*, mais ces réseaux ne pourront pas exploiter pleinement leur « intelligence » sans l'acquisition d'un grand nombre de données *via*, entre autres, des compteurs communicants. Le déploiement de ces compteurs pose alors une première question éthique sur la protection des données générées par ces compteurs, qui permettraient de connaître plus précisément les habitudes énergétiques des consommateurs, mais pose également des questions de cybersécurité.

En outre, le développement de l'autoconsommation d'énergie produite localement pose d'autres questions éthiques, fondamentales en ce sens que l'énergie, en particulier électrique, est devenue indispensable dans les sociétés industrialisées pour assurer nos modes de vie en termes de confort sanitaire, de sécurité, d'éducation, etc. En effet, l'autoconsommation remet en question les réseaux électriques actuels, fortement centralisés en termes de production et de gestion. Elle constitue de fait une révolution énergétique, qui pourrait être comparée pour l'autoconsommation collective, en situation extrême c'est-à-dire si le gestionnaire du réseau public de distribution ne jouait plus le rôle de tiers de confiance, à l'« ubérisation » (échanges de services entre particuliers sans passer par de grandes entreprises établies, grâce à des applications Internet) des services de transport automobile urbain ou des logements pour de courts séjours. Si ce n'est que la disponibilité de l'électricité est devenue cruciale au fonctionnement de nos sociétés, qui en sont devenues fortement dépendantes, et que l'autoconsommation pourrait remettre en cause les principes français de solidarité énergétique et d'égalité d'accès à l'énergie (en termes de coût). Ces derniers points posent de nouvelles questions éthiques, en particulier face au risque d'accroissement de la précarité énergétique, voire de l'apparition de communautarisme énergétique. Ne peut-on par exemple imaginer que l'autoconsommation pourrait enrichir des

consommateurs déjà en situation favorable, tels que des ménages aisés pouvant installer des panneaux solaires sur le toit de leurs habitations ?

Par ailleurs, l'autoconsommation vise à développer la production des « nouvelles » sources d'énergie renouvelable (essentiellement d'origine solaire, mais aussi éolienne) qui sont par nature variables et dépendantes de la météorologie (avec en particulier d'importants effets diurnes et saisonniers). Le changement climatique en cours induit dès lors une incertitude supplémentaire sur le comportement de ces nouvelles approches technologiques dans le futur.

Ces considérations doivent nous amener à garder à l'esprit une règle éthique proposée par Giorgini [GIO 18] : « Tu ne confieras pas à tes enfants le soin de résoudre des problèmes que tu as créés volontairement, qui sont vitaux pour ta descendance et pour lesquels tu n'as pas la certitude de l'existence actuelle ou à venir d'une solution réaliste. D'autre part, les avancées générées par la découverte scientifique et ou le développement technique considéré viseront un renforcement du bien commun et favoriseront la restauration des écosystèmes initiaux, s'ils procuraient équilibre et harmonie, partout où c'est possible. »

Il ne s'agit pas de limiter la recherche sur le développement des *smart grids* et de l'autoconsommation, mais d'amener ces recherches à être questionnées régulièrement par les dimensions éthiques mises en évidence ci-dessus (même si les risques paraissent de moindre ampleur et d'une autre nature que ceux induits par le développement de l'énergie nucléaire). Cela passera par des approches interdisciplinaires de ces questions, en associant les sciences et les techniques avec la sociologie, l'économie, l'éthique, voire les questions juridiques. Le législateur jouera ainsi un rôle important pour assurer un « contrefort éthique » [GIO 18] aux nouvelles méthodes de production et de consommation énergétiques.

Au sein de l'Europe, l'Allemagne est très en avance sur la mise en place de l'autoconsommation électrique avec 500 000 installations en 2018, pour seulement 20 000 en France, où le législateur cherche encore à définir le cadre réglementaire. Les débats portent sur la notion de localité liée à l'autoconsommation, qui peut être définie de différentes façons : elle peut être limitée à une partie du réseau de distribution (par exemple en aval d'un poste MT-BT, c'est-à-dire moyenne tension-basse tension desservant une partie d'un quartier résidentiel [CRE 18]) ou par une distance telle qu'un rayon d'un kilomètre autour de la centrale de production [MIN 18], permettant d'envisager des échanges énergétiques entre bâtiments tertiaires de grandes tailles, en plus de quartiers résidentiels. Les taxes font également l'objet de débats, par exemple la taxe visant à soutenir les énergies renouvelables dont l'autoconsommation pourrait être exonérée pour des installations inférieures à 9 kW [CRE 18] ou inférieures à 1 MW [MIN 18]. Enfin, se pose aussi la réduction du tarif d'utilisation du réseau de distribution public dans le cas de l'autoconsommation collective, qui n'utilise que de

petites portions de ce réseau, sachant qu'il restera nécessaire pour assurer une disponibilité énergétique à tous les consommateurs en cas d'absence de production renouvelable ou d'énergie stockée.

Les objectifs de cet ouvrage consistent dès lors à :

- mettre en évidence l'importance du stockage de l'énergie électrique dans le contexte du développement durable, des *smart buildings*, *smart grids* et *smart cities* ;

- montrer la diversité des services que le stockage de l'énergie électrique peut apporter ;

- poser les questions socio-économiques liées aux changements induits par l'émergence des *smart buildings* et *smart grids* et donner des pistes de réponse ;

- présenter des outils méthodologiques permettant de construire un système de gestion énergétique du stockage suivant une approche générique et pédagogique ; ces outils (qui seront présentés au fil de l'ouvrage, en lien avec des cas d'étude concrets) sont basés sur des formalismes causaux, de l'intelligence artificielle et des techniques d'optimisation explicite ;

- illustrer ces approches méthodologiques par de nombreux exemples concrets et pédagogiques concernant l'intégration des énergies renouvelables et des véhicules électriques dans l'habitat (bâtiments, mutualisation énergétique entre bâtiments résidentiels et tertiaires, quartiers urbains, hubs énergétiques ferroviaires).

Le chapitre 1 introduit la problématique du stockage de l'énergie électrique dans les bâtiments, flots de bâtiments, quartiers intégrés dans un large réseau électrique intelligent ou formant un microréseau électrique intelligent. Les besoins de stockage de ces applications sont mis en évidence, ainsi que les apports multiples qu'ils peuvent apporter. Des questions socio-économiques sont introduites, mais c'est dans le chapitre 5 qu'elles seront plus particulièrement développées. Une méthodologie de construction de la gestion du système de stockage, basée sur de l'intelligence artificielle, est développée ; cette méthodologie est particulièrement bien adaptée à la gestion de systèmes complexes intégrant des incertitudes sur la connaissance de la production d'énergie renouvelable et variable, de la consommation (également variable), mais aussi du réseau électrique lorsque le système concerné y est connecté. Cette méthodologie basée sur la logique floue vise plusieurs objectifs requérant un traitement en temps réel.

Les chapitres 2 à 4 traitent de cas impliquant un seul acteur : bâtiment commercial ou bâtiment tertiaire connecté à un réseau puissant, et producteur d'énergie dans une zone non interconnectée à un grand réseau. Cet acteur peut être à la fois consommateur, producteur et stockeur d'énergie électrique.

Dans le chapitre 2 est développé un système de gestion de l'énergie pour un bâtiment commercial de type hypermarché intégrant de la production photovoltaïque et du stockage de l'énergie. Une stratégie de gestion de l'énergie pour le système de stockage est construite à l'aide de la logique floue. Le système de stockage permet de régler la puissance fournie par le réseau en période de pointe et en période creuse, afin de réduire la facture d'électricité et les émissions de CO₂, tout en favorisant l'autoconsommation d'énergie photovoltaïque. La fonction de stockage peut être réalisée par un système dédié, mais aussi partiellement par des charges modulables. Des résultats de simulation sont présentés et différentes topologies (avec ou sans génération photovoltaïque et système de stockage) sont comparées à l'aide d'indicateurs économiques et écologiques.

Dans le chapitre 3, trois technologies – éclairage par LED (diodes électroluminescentes) à intensité variable suivant la luminosité extérieure, production photovoltaïque et batteries – sont associées au sein d'un bâtiment tertiaire, au travers d'un réseau électrique DC (en courant continu ou *Direct Current*) dédié. Ce qui permet de créer un ensemble production intermittente/charge intermittente/stockage, visant à réduire certains étages électroniques de conversion. En conservant une connexion avec le réseau de distribution AC (en courant alternatif ou *Alternative Current*), ce système peut être utilisé pour garantir une alimentation électrique aux dispositifs d'éclairage, mais aussi pour fournir, le cas échéant, de la puissance électrique au réseau AC. Pour permettre à cet ensemble de satisfaire les besoins des utilisateurs en termes d'éclairage, ainsi que les sollicitations au niveau du réseau électrique tout en favorisant l'autoconsommation de la production photovoltaïque locale, une gestion énergétique, en temps réel, est développée suivant la méthodologie utilisant la logique floue, en prenant comme cas d'application une architecture de réseau DC.

Le chapitre 4 présente un système photovoltaïque avec un stockage hybride associant deux technologies de stockage : batteries électrochimiques et supercondensateurs. L'hybridation de deux technologies de stockage est considérée en vue de combiner les avantages de chaque technologie, afin d'accroître la durée de vie du système de stockage, ainsi que le rendement de l'ensemble. Ce système est dédié à l'alimentation électrique d'habitats en zone insulaire ou site isolé. Un algorithme de supervision basé sur la logique floue est développé. L'objectif principal visé est le suivi d'un programme de production prévisionnel, tout en respectant les différentes contraintes du gestionnaire du réseau électrique (lissage de puissance, régulation de fréquence, etc.). Une étude comparative de différentes configurations de stockage, en particulier en termes de durée de vie des éléments de stockage et du coût moyenné de l'énergie, est présentée.

Les *smart grids* déploieront réellement leur potentiel d'innovation en favorisant les interactions entre les différents acteurs du système électrique (producteur,

consommateur, stockeur, gestionnaire de réseau), eux-mêmes devenant des acteurs « électriquement » plus intelligents. Ces acteurs ont des profils de consommation et/ou de production très différents, et des objectifs et/ou des contraintes économiques et sociétaux très variables. De nouveaux jeux d'acteurs peuvent dès lors apparaître, permettant de viser de nouveaux modèles économiques, mais aussi de répondre aux enjeux énergétiques et climatiques en favorisant le développement des énergies renouvelables. Un enjeu de cette évolution est que tous les acteurs y soient gagnants, sans oublier les acteurs en précarité énergétique. Les chapitres 5 à 8 traitent de ces nouveaux enjeux et présentent plusieurs cas d'étude impliquant des acteurs de nature différente.

Dans le chapitre 5, la diversité des acteurs d'un *smart grid* est mise en évidence en définissant la rationalité d'un individu, celle-ci pouvant être variable et influencer sur un jeu d'acteurs. La problématique des changements économiques et sociologiques induits par les *smart grids* est abordée : changement de la chaîne de valeur, modèle contractuel, profils socio-économiques d'acteurs consommateurs, gouvernance. L'acceptabilité sociale à participer à une gestion énergétique est discutée, en particulier l'effacement énergétique dans un bâtiment commercial multiacteurs (galerie marchande) et dans un contexte domestique (ménages dans des bâtiments résidentiels).

Le chapitre 6 discute des échanges de flux d'énergie électrique et de services possibles entre un bâtiment commercial tel qu'un hypermarché alimentaire et d'autres acteurs tels que des producteurs d'énergie renouvelable, le gestionnaire de réseau, des consommateurs tiers (par exemple résidentiels), un système de stockage de type batterie électrochimique et un groupe électrogène, au sein d'un réseau dans une logique d'autoconsommation. Il s'agit de définir les modalités de la gestion de ces échanges, leur rentabilité et leur acceptabilité par chacun des acteurs concernés, professionnels de l'énergie et consommateurs électriques. L'étude se positionne dans la perspective d'une autoconsommation collective entre des acteurs situés dans une zone géographique donnée. Dans un premier temps, un cas d'étude de mutualisation énergétique entre des bâtiments commerciaux, tertiaires et résidentiels est présenté. La notion d'agrégateur de services énergétiques est introduite. Une gestion énergétique basée sur la logique floue est développée et appliquée au cas d'étude. Le cahier des charges est établi pour chaque acteur avec l'appui d'un sociologue permettant d'apprécier les conditions d'acceptabilité et d'implication de chaque acteur dans la démarche de mutualisation énergétique. L'introduction d'un coefficient d'acceptabilité à l'effacement énergétique dans la stratégie de supervision est proposée. Plusieurs scénarios (avec et sans supervision énergétique) sont comparés au moyen d'indicateurs économique, environnementaux, d'autoproduction et d'autoconsommation.

Le chapitre 7 traite de la gestion énergétique d'une communauté énergétique locale, de type écoquartier. Les objectifs considérés sont l'augmentation de l'efficacité énergétique de l'écoquartier et la diminution des émissions de CO₂ par

l'accroissement de la production photovoltaïque autoconsommée dans le mix énergétique local, qui intègre du stockage d'énergie et des turbines à gaz dont l'exploitation est optimisée ; le tout en garantissant le fonctionnement et la stabilité du réseau électrique local du quartier. Cette garantie passe par la satisfaction de l'équilibre offre/demande. L'ambition est une meilleure utilisation des capacités de production face à l'accroissement des nouvelles utilisations de l'électricité (dont les véhicules électriques), mais également le développement d'une gestion énergétique évolutive permettant l'accueil continu de nouveaux moyens de production. La méthode développée vise à prédéterminer le profil de production des générateurs de manière à réaliser une optimisation globale d'une fonction objective pour le réseau électrique urbain, puis à ajuster les points de fonctionnement au cours de la journée, afin de prendre en compte les écarts rencontrés en utilisant un réseau de communication. Plusieurs solutions pouvant exister, cette optimisation bi-niveau permet de rechercher des solutions optimales pour le système électrique afin de :

- maximiser la production des sources renouvelables selon leur disponibilité liées aux conditions météorologiques, mais aussi leur taux d'utilisation au sein du système électrique dans une logique d'autoconsommation ;
- minimiser le coût de l'énergie produite au sein du microréseau ;
- minimiser les quantités de CO₂ équivalent émises par les générateurs conventionnels.

L'ensemble des batteries des futurs véhicules électriques (VE) et des véhicules hybrides rechargeables (VHR) constituera une capacité de stockage conséquente qui pourrait être utilisée comme moyen de stockage pour le réseau électrique lorsque les véhicules y sont raccordés, ou encore pour alimenter spécifiquement des bâtiments. Différentes technologies sont présentées dans le chapitre 8 :

- *Vehicle to Grid* (V2G) : le véhicule alimente (au moyen de sa batterie) le réseau électrique *via* une borne de recharge sur la voie publique ou sur des parkings (par exemple de gares, de centre commerciaux, etc.) ;
- *Vehicle to Home* (V2H) : le véhicule alimente un habitat résidentiel généralement isolé d'un réseau électrique ;
- *Vehicle to Home and Grid* (V2HG) : le véhicule alimente un habitat résidentiel lorsque celui-ci est connecté à un réseau électrique externe au bâtiment, pouvant donc potentiellement être alimenté par ce réseau ou éventuellement l'alimenter ;
- *Vehicle to Building* (V2B) : le véhicule alimente un immeuble résidentiel ou un bâtiment tertiaire ; il s'agit alors évidemment de plusieurs véhicules sur un parking ;
- *Vehicle to Railway Station* (V2S) : le véhicule alimente un bâtiment de gare, voire des installations ferroviaires et inversement ; il s'agit également de plusieurs véhicules sur un parking.

Ce dernier chapitre introduit différentes configurations pour exploiter la réversibilité de la charge des VE évoquée ci-dessus. Les services potentiels et la gestion énergétique d'un parc de véhicules électriques en interaction avec un réseau électrique de distribution sont développés plus en détail, ainsi qu'un superviseur énergétique basé sur la logique floue. L'apport de la charge réversible des VE dans le contexte d'une gare est également abordé.