

# Flexibilisation de la consommation électrique des ménages

## Mesures pour favoriser l'intégration de la production d'origine photovoltaïque

La part de la production suisse d'électricité issue de l'énergie photovoltaïque est appelée à augmenter de façon significative ces prochaines années. Afin de permettre le déploiement à grande échelle de cette source d'énergie, il convient d'en favoriser la consommation à proximité des sites de production. Il est de ce fait intéressant d'analyser la possibilité de déplacer une partie de la consommation des ménages vers les périodes de production maximale des panneaux photovoltaïques.

**Nicolas Wyrsch, Yannick Riesen, Raffael Tschui**

En Suisse, la part de la production d'électricité d'origine photovoltaïque (PV) a atteint 1% à la fin 2013. Celle-ci devrait être la source de nouvelles énergies renouvelables la plus importante à moyen terme puisque, selon la Stratégie énergétique suisse, elle permettra de produire 11,1 TWh en 2050, soit 16,2% de la production électrique totale (68,3 TWh) [1]. Cette estimation est d'ailleurs assez prudente si l'on compare la Suisse à l'Allemagne où cette part s'élève déjà à plus de 6%. À noter aussi que le potentiel de déploiement estimé par Swissolar est de l'ordre de 20%, et ce, dès 2025 [2].

### Motivation

Comme l'électricité d'origine PV est produite de façon décentralisée et présente de fortes fluctuations, il serait bénéfique pour le réseau électrique que celle-ci soit consommée au plus près des sites de production, soit sur le réseau basse tension dans lequel elle est injectée. Une solution pour minimiser les flux d'énergie entre les réseaux basse et moyenne tension consisterait à jouer sur la demande pour absorber un maximum de cette production. Le but recherché est donc de déplacer une partie de la consommation ayant lieu en dehors des heures de production PV vers celles-ci.

L'étude présentée ci-après a été menée afin de tenter de répondre à deux questions :

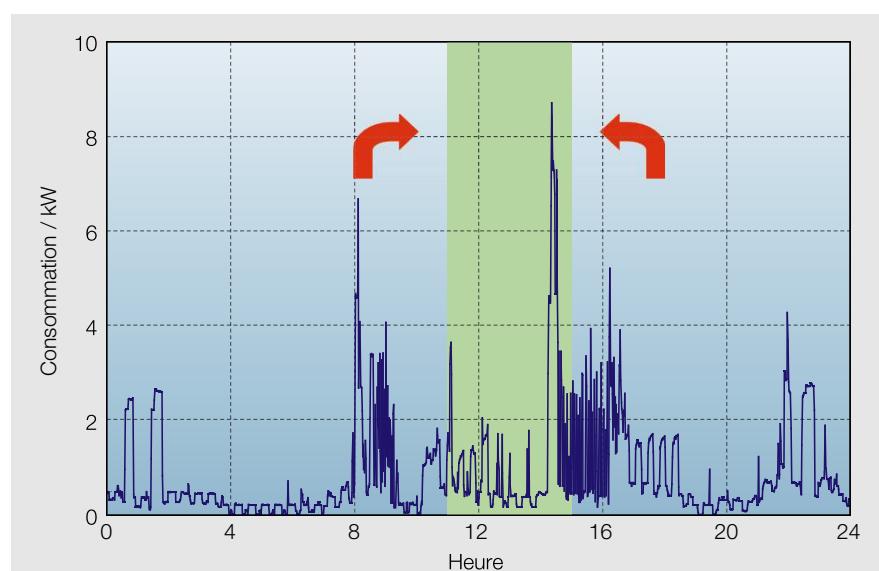
- Quelle est la part de consommation flexible dans les ménages ?
- Comment la déplacer ?

versité de Neuchâtel pour les analyses socio-économiques, le Laboratoire de photovoltaïque (PV-Lab) de l'EPFL pour les analyses techniques et le Groupe E pour la mise à disposition des données de consommation des ménages. Cet article résume les résultats obtenus en ce qui concerne les aspects techniques.

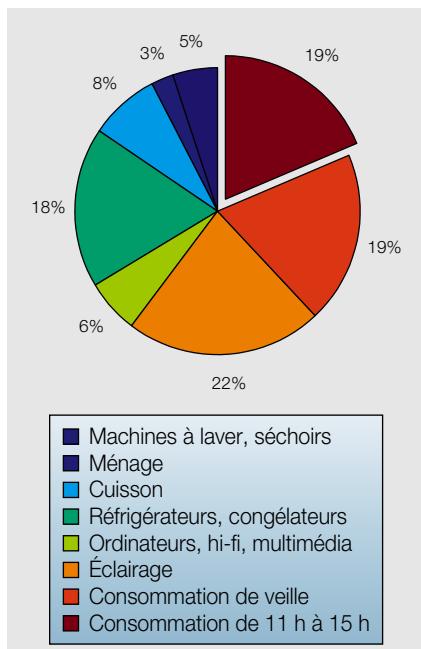
À noter encore qu'afin de simplifier quelque peu l'analyse, des heures de production PV fixes ont été admises, soit la période horaire entre 11 h et 15 h. L'analyse s'est concentrée sur le potentiel de déplacement de la consommation ayant lieu en dehors de cette tranche horaire vers celle-ci (**figure 1**) en utilisant comme indicateur le rapport « consommation entre 11 h et 15 h / consommation totale ». Le terme « potentiel PV » sera utilisé pour ce rapport puisqu'il correspond à la part de consommation qui pourrait potentiellement être couverte par le PV.

### Potentiel théorique

Afin de déterminer le potentiel de flexibilisation, il est nécessaire de déterminer quels sont les appareils électriques enclenchés en fonction de l'heure et de classer ceux-ci selon leur degré de flexibilité. Pour ce travail, les appareils ont été répartis en



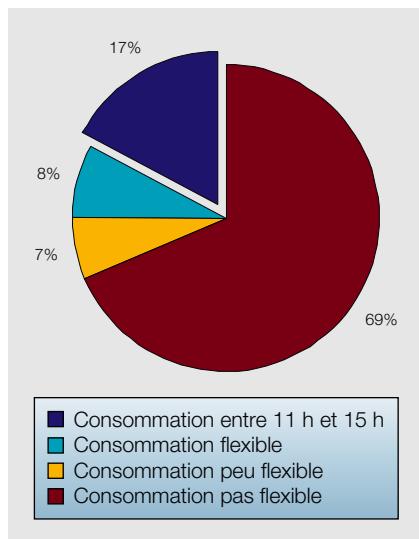
**Figure 1** Exemple d'une courbe de consommation d'un ménage sur 24 h. Le but consiste à déplacer le maximum de consommation dans la période de production PV entre 11 h et 15 h.



trois catégories : flexibles, peu flexibles et non flexibles. Dans la catégorie flexible se trouvent les appareils qui peuvent être utilisés à un autre moment de la journée sans problème majeur ou modification du confort pour les habitants du ménage, soit principalement les machines à laver (le linge et la vaisselle). La catégorie peu flexible comprend les appareils qui engendreraient, en étant utilisés à un autre moment, une diminution de confort ou des coûts de mise en œuvre importants, comme par exemple les ordinateurs, les réfrigérateurs ou les congélateurs. Finalement, la catégorie non flexible regroupe les appareils qui ne peuvent pas être utilisés à un autre moment, comme l'éclairage ou les appareils de cuisson.

#### Identification de la consommation liée aux différents appareils

Malheureusement l'identification des appareils à partir d'une courbe de charge est très problématique surtout quand, comme pour cette étude, les courbes disponibles ont une résolution temporelle de 15 minutes. Pour compléter les données de consommation et contribuer à cette identification, une centaine de ménages ont accepté de remplir un questionnaire détaillant leurs caractéristiques principales, celles de leurs habitants et de leurs occupations (à l'intérieur et à l'extérieur du ménage), ainsi que celles de leurs équipements.



**Figure 3** Parts relatives, pour les ménages du groupe de contrôle, de la consommation journalière moyenne des appareils en fonction de leur potentiel de flexibilisation (consommation en dehors de la période de 11 h à 15 h déplaçable dans cette tranche horaire).

rieur et à l'extérieur du ménage), ainsi que celles de leurs équipements.

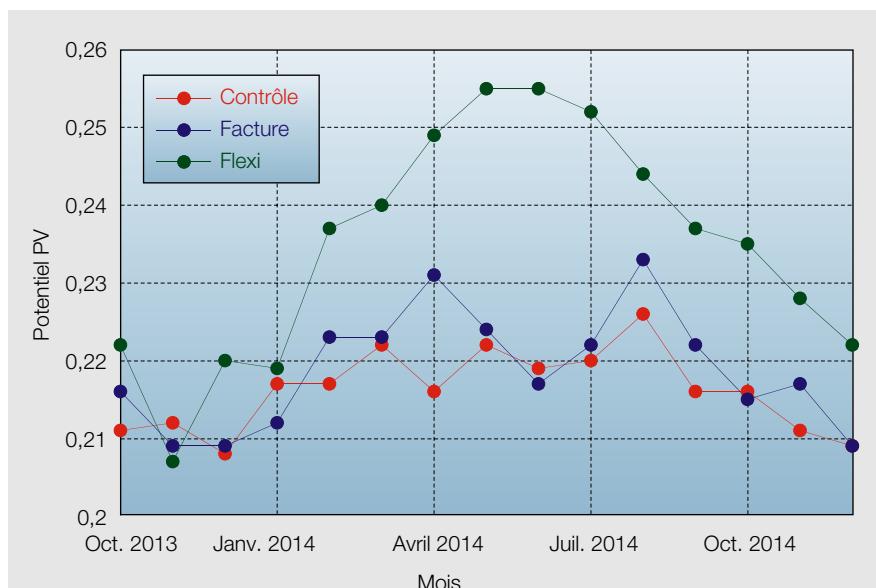
Afin de déterminer l'utilisation effective des appareils du ménage, des courbes de charge ont été simulées (pour chaque ménage, à l'aide de chaînes de Markov [5]) à partir des données des questionnaires, des données statistiques sur les activités humaines en fonction du temps (« time use budget », données de 2005 pour les Pays-Bas [6]) et des données de consommations typiques des appareils électriques du ménage.

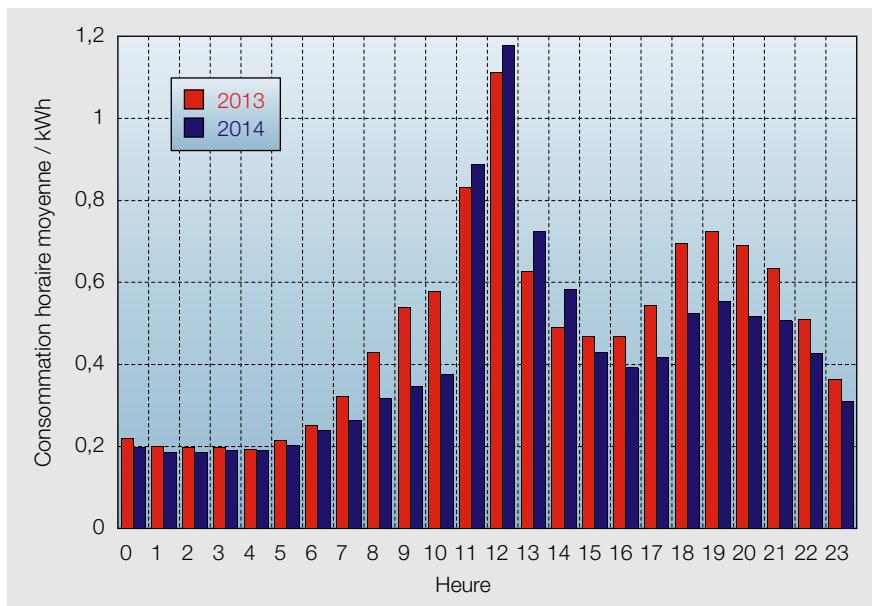
Les courbes de consommation de chaque ménage ont donc été analysées de manière très concrète, jour par jour. La consommation de veille a d'abord été déduite (estimée d'après le minimum de consommation journalière) et la consommation des réfrigérateurs et congélateurs identifiée par le cycle nocturne de consommation. Finalement, la courbe mesurée a été approchée en choisissant parmi les activités les plus probables à un moment de la journée, celle qui reproduit le mieux cette courbe par la consommation des appareils liés à cette activité. Cette simulation a été effectuée en tenant compte des données du ménage (résultats des questionnaires), ainsi que de la date et de l'heure pour l'éclairage. Pour les ménages comprenant plusieurs personnes, il a aussi été tenu compte des possibles interactions entre celles-ci pour déterminer les activités possibles et la consommation correspondante.

#### Résultats des simulations

Pour la centaine de ménages considérés pendant l'étude, les consommations relatives des divers groupes d'appareils en dehors de la période de production PV, ainsi que la consommation totale de tous ces appareils pendant la période de production PV (11 h à 15 h) sont représentées dans la **figure 2**. Un potentiel PV de 19% peut être déduit de cette analyse.

Pour le groupe de contrôle, l'un des trois groupes dans lesquels ont été répartis la centaine de ménages pour la suite pratique de l'étude (celui qui n'a participé que





**Figure 5** Consommation horaire moyenne du ménage le plus performant du groupe « flexi » avant (2013) et après (2014) le début de l’expérience.

passivement), la consommation électrique entre 11 h et 15 h représente 17% de la consommation électrique totale sur 24 h et le potentiel de flexibilisation en dehors de la période de production PV est de 8% (**figure 3**). Les valeurs du potentiel PV déterminées ici par simulation sont de 10 à 20% inférieures aux valeurs obtenues d’après les courbes de charge mesurées. De manière générale, cette approche tend en effet à sous-estimer un peu les valeurs de consommation estimées. Plusieurs facteurs pourraient expliquer cet effet: un inventaire incomplet des appareils du ménage, des appareils non considérés, un modèle de consommation imprécis, les hypothèses sur les interactions entre personnes pour les ménages à plusieurs personnes, une consommation des réfrigérateurs et congélateurs plus importante pendant la journée, etc.

### Mesures incitatives

Dans le cadre de cette étude, deux types de mesures incitatives ont été comparées. Pour ce faire, trois groupes de ménages statistiquement homogènes ont été formés: le groupe « facture », le groupe « flexi » et, pour la comparaison des résultats, un groupe de contrôle n’ayant reçu aucune information particulière. Les ménages du groupe « facture » ont pour leur part reçu une information individuelle sur leur consommation et son évolution, ainsi qu’une comparaison avec des ménages similaires. Les ménages du groupe « flexi » ont, quant à eux, été incités financièrement à déplacer leur consommation en participant à un

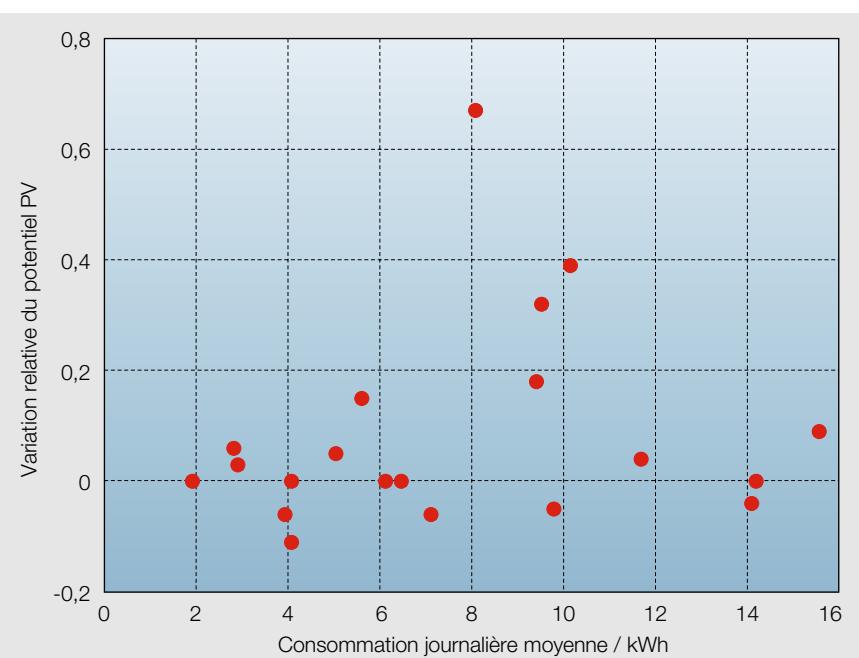
concours mensuel récompensant les ménages les plus performants par un prix (50, 20 ou 10 francs suisses).

Les groupes de ménages ont été suivis 3 mois afin de déterminer leurs habitudes de consommation, puis les groupes « facture » et « flexi » ont été informés au début de l’expérience effective (le 1<sup>er</sup> janvier 2014) sur les buts à atteindre, soit déplacer leur consommation dans la tranche horaire comprise entre 11 h et 15 h sans augmenter leur consommation totale. Tous les ménages ont ensuite été suivis sur une période de 12 mois.

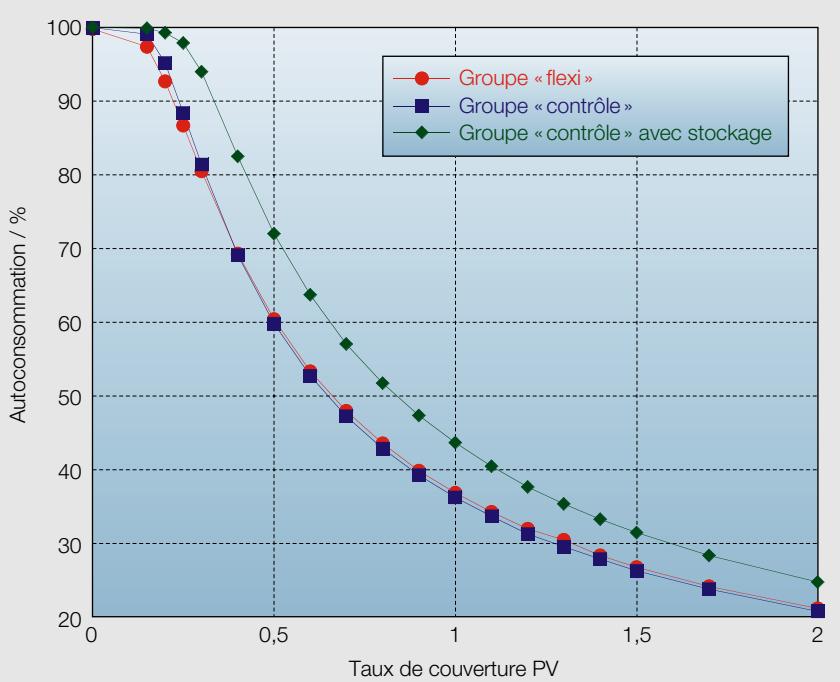
### Effets des mesures incitatives

La **figure 4** montre l’évolution du potentiel PV pendant l’expérience. Celui-ci est resté stable, avec peu de variations saisonnières pour le groupe de contrôle, ainsi que pour le groupe « facture ». Par contre, le groupe « flexi » a clairement modifié ses habitudes avec un déplacement de 3 à 4% de sa consommation au début de l’expérience, déplacement diminuant vers 2% à la fin de la période de 12 mois. La **figure 5** montre le changement de consommation horaire du ménage le plus performant qui a atteint près de 10% d’augmentation du potentiel PV; la consommation a clairement été diminuée le matin et le soir et déplacée en partie vers la mi-journée.

Il est clair que tous les ménages ne sont pas en mesure de modifier leurs habitudes. Si le ménage est inoccupé en milieu de journée pendant les jours de travail, les possibilités de déplacement de la consommation sont considérablement réduites. Sur la **figure 6**, les performances (variation relative du potentiel PV) des ménages du groupe « flexi » sont représentées en fonction de leur consommation journalière moyenne. On remarque que seule une minorité des ménages a réussi à déplacer une part significative de sa consommation. Les ménages avec une consommation faible n’ont peut-être pas pu et ceux avec une consommation élevée n’ont peut-être pas été assez motivés. On peut aussi en conclure que les résultats globaux du groupe « flexi » ont été



**Figure 6** Variation relative du potentiel PV des ménages du groupe « flexi » en fonction de leur consommation journalière moyenne.



**Figure 7** Autoconsommation (données agrégées pour les ménages) en fonction du potentiel de couverture de la consommation annuelle par du PV: données pour tous les ménages du groupe de contrôle, du groupe « flexi » et du groupe de contrôle avec une capacité de stockage correspondant à 10 % de sa consommation journalière.

atteints grâce à une minorité de ménages qui auront réussi à déplacer une grande partie de leur consommation flexible. Le choix des mesures incitatives est donc très important pour avoir un effet à long terme sur le plus grand nombre de ménages.

### Autres mesures techniques

Les réfrigérateurs et congélateurs sont responsables d'une part importante de la consommation électrique; en dehors de la période de production PV, celle-ci s'élève en moyenne à 18% de la consommation totale (**figure 2**). En flexibilisant la consommation des congélateurs (en jouant sur la très grande inertie thermique des appareils modernes), il devrait être possible de déplacer la plus grande partie de leur consommation. En admettant une part égale de consommation entre réfrigérateurs et congélateurs et en considérant que la flexibilisation ne peut avoir lieu que pendant les journées dotées d'une production PV suffisante, une part supplémentaire de 3 à 5% de la consommation pourrait être flexibilisée et couverte par le PV.

Finalement, la part de la consommation électrique utilisée pour la production d'eau chaude domestique est appelée à augmenter de façon importante ces prochaines années. Pour Cernier, la moyenne annuelle de la consommation

due à l'utilisation de « boilers » a été estimée à environ 2% de la consommation totale de l'ensemble des ménages du village. Toutefois les « boilers » devraient

disparaître à moyenne échéance et être remplacés en grande partie par des pompes à chaleur. Le parc de ces dernières devrait aussi s'étendre avec le remplacement des chauffages centraux à mazout. On peut estimer que pour un ménage équipé d'une pompe à chaleur, cette part de la consommation serait d'au moins 10%. Aujourd'hui, l'eau sanitaire est chauffée exclusivement de nuit pour bénéficier des tarifs avantageux de l'électricité, mais cette consommation électrique peut être rendue totalement flexible. Elle pourrait à l'avenir se faire pendant les heures de production PV et un potentiel de flexibilisation additionnel de 10% pourrait être obtenu.

### Discussion et conclusions

Sans mesure de flexibilisation ou de stockage, la part de la production PV qu'un ménage doté d'un système PV dimensionné pour couvrir sa consommation annuelle peut autoconsommer (consommation de sa propre production PV) s'élève environ à 30%. En agrégeant les ménages, ce facteur d'autoconsommation augmente et atteint, par exemple pour le cas de la centaine de ménages de Cernier, 36,7%. Avec la flexibilisation réalisée par le groupe « flexi », ce facteur atteint même 36,8% avec seulement

## Zusammenfassung Flexibilisierung des Stromverbrauchs privater Haushalte

### Massnahmen zur Förderung der Integration von Strom aus Photovoltaik-Anlagen

Der Anteil der Schweizer Stromproduktion aus Photovoltaik-Anlagen (PV) soll sich in den kommenden Jahren deutlich erhöhen. Für einen grossflächigen Einsatz ist es zweckmäßig, den produktionsnahen Verbrauch zu fördern. Eine Studie wurde durchgeführt, um zu analysieren, inwieweit sich ein Teil des Verbrauchs der privaten Haushalte auf den Zeitraum der maximalen Einspeisung von Photovoltaik-Anlagen, das heißt zwischen 11 und 15 Uhr, verlagern lässt.

Zu diesem Zweck wurde das typische Verbraucherverhalten von rund hundert Haushalten in Cernier (Kanton Neuenburg) 3 Monate lang untersucht. Diese Haushalte wurden anschliessend für 12 Monate in 3 Gruppen unterteilt: eine (passive) Kontrollgruppe, eine Gruppe «Faktura», bei der die Haushalte über ihren Verbrauch und dessen Entwicklung im Vergleich zu ähnlichen Haushalten informiert wurden, und eine Gruppe «Flexi», die durch finanzielle Anreize (Belohnung in Höhe von 50, 20 und 10 CHF für die besten Haushalte) dazu motiviert wurde, ihren Verbrauch auf den Zeitraum zwischen 11 und 15 Uhr zu verlagern. Es zeigte sich, dass nur die Gruppe «Flexi» ihre Gewohnheiten änderte, indem sie 3-4% ihres Tagesverbrauchs verlagerte (der beste Haushalt erreichte 10%). Aber es könnten auch andere, technische Massnahmen umgesetzt werden, wie etwa die teilweise Verlagerung des Verbrauchs bei der Warmwasseraufbereitung oder der Nutzung von Kühls- und Gefriergeräten.

Fazit: Die Flexibilisierung ermöglicht zwar eine Steigerung des Selbstverbrauchs, aber der Einsatz eines lokalen elektrischen Speichers, der rund 10% des durchschnittlichen Tagesverbrauchs speichern kann, ist effizienter. Die Systeme zur Warmwasseraufbereitung («Boiler» oder Wärmepepumpen) stellen ihrerseits eine leicht umsetzbare und effiziente Form der Flexibilisierung dar, die auch genutzt werden kann, um überschüssige PV-Einspeisung aufzufangen. Letztere ist daher zu bevorzugen.

CHe

20 ménages (effet d'agrégation réduit). Comme on l'observe sur la **figure 7**, la flexibilisation permet d'augmenter l'auto-consommation ou, pour une quantité identique d'électricité injectée dans le réseau moyenne tension, la puissance PV installée. La part de consommation flexible déplacée dans la période de production PV permet d'installer une quantité correspondante de panneaux PV dont la production sera consommée localement.

S'il est possible de bénéficier d'une capacité de stockage local, la **figure 7** montre (pour une capacité de stockage équivalente à 10 % de la consommation moyenne journalière) que le potentiel de couverture PV additionnel est considérable et plus important que la flexibilisation d'une quantité équivalente de consommation. L'effet du stockage est donc plus efficace que la flexibilisation de la demande pour maximiser la pénétration du PV. Ceci est dû au fait que la part de la production stockée peut être contrôlée et adaptée à tout moment. Il s'agit en effet d'un élément de consommation totalement flexible, pas seulement dans le temps mais aussi en termes de puissance, alors que la flexibilisation de la demande, telle qu'étudiée à Cer-

nier, ne joue que sur la flexibilisation dans le temps.

La production d'eau chaude (par «boilers» ou pompes à chaleur) est également un élément important à considérer. Non seulement ces consommateurs peuvent devenir totalement flexibles, mais cette consommation peut être régulée à la demande, comme on le ferait avec une installation de stockage, pour absorber les excédents de production PV. Il s'agit d'ailleurs d'une solution de stockage de l'énergie dont le bénéfice pour les réseaux électriques est comparable à un stockage électrochimique [7]. Cette forme de flexibilisation est facile à mettre en œuvre et particulièrement efficace. Elle est donc à privilégier.

### Références

- [1] Perspectives énergétiques 2050. Rapport de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2013.
- [2] L'électricité solaire, une énergie inépuisable. Brochure Swissolar. [www.swissolar.ch/fileadmin/user\\_upload/Shop/10401f\\_Solarstrom\\_Broschuere.pdf](http://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Shop/10401f_Solarstrom_Broschuere.pdf).
- [3] J. Coquoz : Potential contribution of households' demand response for integration of distributed solar photovoltaic in Switzerland. Thèse de master ETHZ, 2012.
- [4] K. Degen, Ch. Efferson, F. Frei, L. Goette, R. Lalive: Smart Metering, Beratung oder Sozialer Vergleich: Was beeinflusst den Elektrizitätsverbrauch? Rapport final du projet OFEN SI/500475-01, 2013.
- [5] J. Torriti: A review of time use models of residential electricity demand. Renewable and Sustainable Energy Reviews 37, pp. 265-272, 2014.
- [6] MTU Netherlands 2005. [www.timeuse.org/](http://www.timeuse.org/) information/access-data.
- [7] Y. Riesen et al.: Peak Shaving Capability of Household Grid-Connected PV-System with Local Storage: A Case Study. Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, pp. 3740-3744, 2013.

### Auteurs

D'**Nicolas Wyrtsch** a obtenu son diplôme de physicien de l'ETHZ en 1984 et son doctorat ès sciences de l'Institut de microtechnique (IMT) de l'Université de Neuchâtel en 1991. Il est depuis chef de groupe dans le laboratoire de photovoltaïque de l'EPFL (anciennement de l'IMT) et travaille sur le développement de dispositifs en couches minces de silicium et l'intégration de systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques. Il est également chargé de cours à l'EPFL. EPFL-STI-PV-Lab, 2002 Neuchâtel, [nicolas.wyrtsch@epfl.ch](mailto:nicolas.wyrtsch@epfl.ch)

**Yannick Riesen** est physicien diplômé de l'ETHZ (2010). Depuis 2011, il est doctorant dans le laboratoire de photovoltaïque de l'EPFL. Il a participé à plusieurs projets sur les rendements énergétiques des cellules photovoltaïques, l'intégration de systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques, ainsi que sur les aspects de stockage. [yannick.riesen@epfl.ch](mailto:yannick.riesen@epfl.ch)

**Raffael Tschui** est étudiant de master en génie électrique et électronique de l'EPFL. Il a participé activement à ce travail dans le cadre de son service civil. [rafael.tschui@epfl.ch](mailto:rafael.tschui@epfl.ch)

Les auteurs remercient l'OFEN (dans le cadre du projet Flexi) et la CTI (dans le cadre du projet SCCER-Furies) pour leur soutien financier.