



**HAL**  
open science

# Gestion multicritère des ressources énergétiques à l'échelle d'un habitat individuel: interaction bâtiment/réseau électrique

Aurélie Chabaud, Julien Eynard, Stéphane Grieu

## ► To cite this version:

Aurélie Chabaud, Julien Eynard, Stéphane Grieu. Gestion multicritère des ressources énergétiques à l'échelle d'un habitat individuel: interaction bâtiment/réseau électrique. 5èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Jul 2013, Strasbourg, France. Communication JD-4.4, Session JD-4: Approches multi-critères. hal-00844539

**HAL Id: hal-00844539**

**<https://hal.science/hal-00844539>**

Submitted on 15 Jul 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Gestion multicritère des ressources énergétiques à l'échelle d'un habitat individuel : interaction bâtiment/réseau électrique

Aurélié CHABAUD<sup>1,2</sup>, Julien EYNARD<sup>1,2</sup>, Stéphane GRIEU<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire PROMES-CNRS, UMR 8521  
Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan, France

<sup>2</sup>Université de Perpignan Via Domitia  
52 Avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan, France

[aurelie.chabaud@promes.cnrs.fr](mailto:aurelie.chabaud@promes.cnrs.fr), [julien.eynard@promes.cnrs.fr](mailto:julien.eynard@promes.cnrs.fr), [stephane.grieu@promes.cnrs.fr](mailto:stephane.grieu@promes.cnrs.fr)

**Résumé**— Cet article présente une approche multicritère pour la gestion des ressources énergétiques à l'échelle d'un habitat individuel raccordé au réseau électrique et intégrant une production locale. La stratégie de gestion prend en compte l'état du réseau électrique afin de minimiser l'impact négatif de la production locale d'énergie et de la consommation électrique. Pour cela, un habitat individuel, un système de production (des panneaux solaires photovoltaïques) et un système de stockage ont été modélisés. Différents critères énergétiques et économiques sont proposés pour évaluer le dimensionnement de ces systèmes et la pertinence de la stratégie. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'obtenir des configurations intéressantes n'impactant pas négativement le réseau électrique et permettant de maximiser un critère défini à partir de l'autoconsommation d'énergie et du taux de couverture de la production locale.

**Mots-clés**— Bâtiment, production et stockage d'énergie, réseau électrique, gestion multicritère, dimensionnement optimal.

## I. INTRODUCTION

Le bouleversement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre, la raréfaction des réserves d'énergie fossile et l'augmentation de la demande énergétique mondiale, en raison notamment de la croissance démographique des pays en voie de développement et des problèmes socio-économiques liés aux pannes électriques, sont des problématiques importantes. Il en résulte une libéralisation du marché de l'énergie, le développement des systèmes de production décentralisés, dont le caractère intermittent est une contrainte forte, et la volonté de réduire la facture énergétique. Il est alors nécessaire de disposer de réseaux électriques fiables et performants et de trouver un équilibre entre offre et demande.

Le raccordement massif au réseau de distribution des systèmes de production décentralisés a un impact sur le fonctionnement de ce réseau, impact qui peut s'étendre jusqu'au réseau de transport. Sont concernées les grandeurs électriques (flux de puissance, plan de tension, courant de court-circuit) ainsi que l'exploitation et la planification du réseau (stabilité, plan de protection, continuité et qualité de service, etc.) [2,6,9,17]. En effet, le réseau électrique a été pensé et conçu de façon radiale et unidirectionnelle afin d'acheminer l'électricité des centres de production jusqu'aux consommateurs [4,18]. Toutefois, le réseau de distribution actuel n'est plus passif mais actif. Ainsi, le réseau électrique doit devenir plus flexible [5,8], favorisant ainsi l'intégration de la production décentralisée et permettant d'améliorer la gestion économique de l'électricité ainsi que la sécurité de son transport [10,20]. Ceci est possible grâce au développement de

systèmes intelligents capables de minimiser les impacts induits par l'injection sur le réseau de tout ou partie de la production décentralisée. Des travaux ont déjà permis de mettre en évidence une nouvelle architecture pour le réseau de distribution [2,14], d'autres étudiant la gestion énergétique par effacement des consommations de pointe [3,11].

En France, le secteur résidentiel est le plus gros consommateur d'énergie, avec 28,7% de l'énergie finale consommée, 60% de cette consommation concernant le poste de chauffage. Par conséquent, la maîtrise de l'énergie dans ce secteur est essentielle. Ainsi, le but des travaux présentés est de proposer une approche multicritère de gestion énergétique [12,15] à l'échelle d'un habitat individuel multi-énergie (avec systèmes de production et de stockage intégrés au bâti). Son impact sur le réseau électrique local est considéré, ce qui fait la particularité de la stratégie développée. Enfin, une tarification dynamique est proposée, sur la base de la charge de ce réseau électrique.

La première partie de cet article décrit la stratégie de gestion de l'énergie électrique (production, stockage et consommation) développée pour un habitat individuel raccordé au réseau électrique. La seconde partie de l'article présente un cas d'étude. Un habitat individuel équipé de panneaux solaires photovoltaïques et de batteries a ainsi été modélisé. Enfin, les résultats du dimensionnement de ces systèmes et l'application de la stratégie sont détaillés dans la troisième partie.

## II. STRATÉGIE DE GESTION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES

### A. Systèmes considérés et objectifs

Nous nous intéressons à l'étude et à la gestion d'habitats raccordés au réseau électrique et disposant de systèmes de production électrique intégrés au bâti. Ces habitats exploitent des ressources énergétiques renouvelables. Peuvent être ici considérés, des panneaux solaires photovoltaïques, des piles à combustible, des éoliennes, des turbines hydro-électriques ou tout autre système permettant de produire de l'électricité localement. Afin d'optimiser l'exploitation de cette production locale, un système de stockage de l'électricité est également considéré, par exemple des batteries électriques. La stratégie de gestion doit favoriser l'autoconsommation d'énergie et minimiser l'impact des systèmes de production locaux sur le réseau électrique (achat et vente d'électricité).

### B. Critères d'évaluation

Afin de juger des performances de la stratégie de gestion énergétique proposée, plusieurs critères permettant d'évaluer les coûts énergétiques et économiques ont été définis.

### 1. Taux de couverture EnR

$\%_{EnR_c}$  est le pourcentage d'énergie consommée dont l'origine est renouvelable. L'énergie totale consommée est la somme de l'énergie soutirée au réseau électrique  $E_{EDF}$  et de l'énergie renouvelable produite localement et consommée. Ces énergies sont exprimées en kWh. Ce critère est à maximiser pour diminuer la dépendance de l'habitat au réseau électrique (1) :

$$\%_{EnR_c} = 100 \times \frac{EnR_c}{EnR_c + E_{EDF}} \quad (1)$$

### 2. Autoconsommation d'énergie

Le pourcentage d'énergie renouvelable autoconsommée  $\%_{AC}$  est le rapport entre l'énergie renouvelable consommée,  $EnR_c$  (kWh), et celle produite,  $EnR_p$  (kWh). Ce critère est à maximiser afin de favoriser l'autoconsommation de l'énergie renouvelable produite localement (2) :

$$\%_{AC} = 100 \times \frac{EnR_c}{EnR_p} \quad (2)$$

### 3. Utilisation de l'énergie renouvelable

Afin de combiner au sein d'un seul et même critère la part d'énergie renouvelable produite et autoconsommée et le taux de couverture EnR, dont la seule optimisation conduirait à sur-dimensionner ou sous-dimensionner les systèmes, un critère global  $J_{EnR}$  (%) offrant un compromis intéressant entre  $\%_{EnR_c}$  et  $\%_{AC}$  est proposé (3) :

$$J_{EnR} = \frac{(\%_{EnR_c}) \times (\%_{AC})}{100} \quad (3)$$

### 4. Tarification dynamique et coût économique

Le critère de coût économique  $J_{coût}$  (€) est déterminé non pas selon les tarifs d'achat et de vente actuellement pratiqués par EDF mais sur la base d'une tarification dynamique dont l'application aux particuliers est prévue prochainement. Cette tarification, déjà utilisée pour le marché de l'énergie, consiste à faire varier le prix de cette dernière de façon dynamique, sur des pas de temps courts, afin de suivre les coûts de production de l'électricité, selon l'heure de la journée. Ces coûts sont plus importants pendant les pics de consommation, en raison du type d'énergie employé. La variabilité des coûts de production de l'électricité dépend donc de la charge du réseau, qui varie de façon journalière mais également saisonnière. Ainsi, un modèle polynomial du coût de l'énergie  $C_{En}$  a été identifié en fonction de la charge  $P_{res}$  et de la température extérieure  $T_{ext}$ , avec  $i, j \in \llbracket 1,5 \rrbracket$  (4) (table I). L'erreur quadratique moyenne est de 16,78.

$$C_{En}(t) = \sum_{i,j} a_{ij} \times P_{res}^i(t) \times T_{ext}^j(t) \quad (4)$$

TABLE I

COEFFICIENTS DU MODÈLE POLYNOMIAL DU PRIX DE L'ÉNERGIE

$j \setminus i$	0	1	2	3	4	5
0	$6,58 \cdot 10^1$	$-0,38 \cdot 10^1$	$7,67 \cdot 10^{-2}$	$-5,12 \cdot 10^{-4}$	$3,48 \cdot 10^{-7}$	$6,37 \cdot 10^{-9}$
1	$-1,77 \cdot 10^1$	$9,27 \cdot 10^{-1}$	$-1,64 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$-4,04 \cdot 10^{-7}$	-
2	$6,04 \cdot 10^{-2}$	$-3,12 \cdot 10^{-3}$	$4,41 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-7}$	-	-
3	$-5,16 \cdot 10^{-4}$	$-1,96 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
4	$4,11 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-
5	$2,01 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	-

Le coût économique  $J_{coût}$  (€) est alors défini comme la différence entre l'énergie soutirée au réseau,  $E_{EDF}$  (kWh), et

l'énergie injectée sur le réseau,  $E_{inj}$  (kWh), en considérant le coût de l'électricité  $C_{En}$  (5) :

$$J_{coût} = \sum_t E_{inj}(t) \cdot C_{En}(t) - E_{EDF}(t) \cdot C_{En}(t) \quad (5)$$

### 5. Impact du bâtiment sur le réseau électrique

Comme mentionné, la charge sur le réseau EDF ( $P_{res}$ ) varie de façon journalière (plusieurs pics de consommation) mais aussi saisonnière (consommation plus importante l'hiver que l'été). Afin de définir l'état du réseau électrique, tout en tenant compte de ces variations hors-saisonniers, une normalisation journalière de la charge  $\tilde{P}_{res}$  est réalisée. Un seuil réseau est alors fixé, définissant une limite entre situation favorable et situation défavorable à l'injection réseau. La normalisation de l'écart entre ce seuil et l'état du réseau permet de quantifier le caractère plus ou moins favorable de l'injection. Ainsi, l'écart entre ce seuil et l'état du réseau est normalisé entre 0 et 1 lorsqu'il est supérieur au seuil et entre 0 et -1 lorsqu'il est inférieur à ce seuil (figure 1).

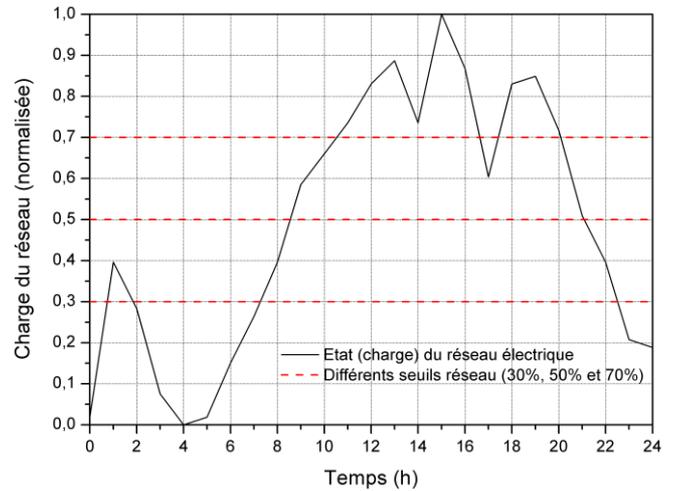


Fig. 1. État (charge) du réseau le 28 janvier 2006 et seuils réseau

L'impact de l'injection de la production locale d'énergie sur le réseau  $I_{inj}$  est défini par le produit de l'énergie injectée sur le réseau  $E_{inj}$  et de l'écart normalisé entre le seuil et l'état du réseau  $\Delta E_{seuil}$  (6) :

$$I_{inj} = \frac{1}{1000} \times \sum_t E_{inj}(t) \times \Delta E_{seuil}(t) \quad (6)$$

L'impact du soutirage sur le réseau électrique  $I_{sout}$  est défini de façon identique mais la normalisation de l'écart entre le seuil et l'état du réseau est opposée à celle réalisée dans le cas de l'injection (7) :

$$I_{sout} = -\frac{1}{1000} \times \sum_t E_{EDF}(t) \times \Delta E_{seuil}(t) \quad (7)$$

Un impact global de l'habitat  $I_g$  sur le réseau électrique peut alors être défini par la somme de  $I_{inj}$  et de  $I_{sout}$  (8) :

$$I_g = I_{inj} + I_{sout} \quad (8)$$

### B. Stratégie de gestion

La gestion des ressources énergétiques dépend de la production décentralisée, de la charge, de l'état de la batterie, ainsi que de l'état du réseau électrique à chaque instant (figure 2). On peut distinguer trois cas :

① *Surproduction*. La production d'énergie renouvelable est supérieure à la consommation instantanée. La production EnR

satisfait donc la totalité de la consommation de l'habitat et la quantité d'énergie soutirée au réseau électrique est nulle. La gestion du surplus d'énergie s'appuie sur l'état du réseau. Si celui-ci est soumis à une forte demande (période de pointe, dans ce cas  $\widetilde{P}_{res} = 1$ ), le surplus d'énergie y sera injecté. Sinon, si la batterie n'est pas déjà totalement chargée, le surplus d'énergie est en partie ou en totalité stocké.

② *Equilibre entre production et demande.* Toute l'énergie produite est autoconsommée et aucune interaction avec le réseau électrique et la batterie n'est nécessaire.

③ *Sous-production.* La consommation énergétique est supérieure à la production EnR. De ce fait, l'énergie produite localement est entièrement autoconsommée. Toutefois, pour satisfaire les besoins du consommateur, le déstockage de l'énergie présente dans la batterie est favorisé, à condition que celle-ci soit suffisamment chargée. Sinon, la quantité d'énergie manquante est soutirée au réseau électrique.

### III. MODÉLISATION

#### A. Modélisation d'un habitat individuel

Le logiciel TRNSYS [19] a permis la modélisation thermique et la simulation dynamique du comportement énergétique d'un bâtiment (et des différents systèmes qui l'équipent) en fonction, notamment, de sa structure, des matériaux utilisés et de sa

situation géographique. TRNSYS s'appuie sur des modèles numériques. Le bâtiment considéré pour cette étude est une maison de plain-pied, d'une surface de 150 m<sup>2</sup>, située à Perpignan et occupée par deux adultes et deux enfants. Le plan de cet habitat est présenté par la figure 3. La composition de ses éléments est donnée par la table II. Les matériaux utilisés sont courants et permettent de se rapprocher des valeurs seuils du coefficient de transmission thermique imposées par la RT 2005 ( $U_{RT2005}^{max}$ ) [13]. Des panneaux solaires photovoltaïques ont également été modélisés. Différentes courbes de charge ont été exploitées pour mettre en évidence les vecteurs de consommation de l'énergie. Le mode de vie des occupants a par ailleurs été modélisé. Les scénarios d'occupation et de comportement permettent de gérer de façon pertinente le fonctionnement du système de chauffage et de climatisation (d'une puissance de 1 kW) et les appareils électroménagers. Pour cette étude, le contrôle de la température dans l'habitat est basé sur des consignes de température et d'occupation fixées par la RT 2005 [7]. Le scénario d'occupation prévoit la présence des occupants en semaine de 0h à 10h et de 18h à 24h et une présence continue de 0h à 24h le week-end. Le scénario de température est défini comme suit : consigne en chauffage et en refroidissement de 19°C et 28°C pendant les périodes d'occupation et de 16°C et 30°C sans occupation. Des simulations d'une durée d'un an (8760 h) ont été réalisées.

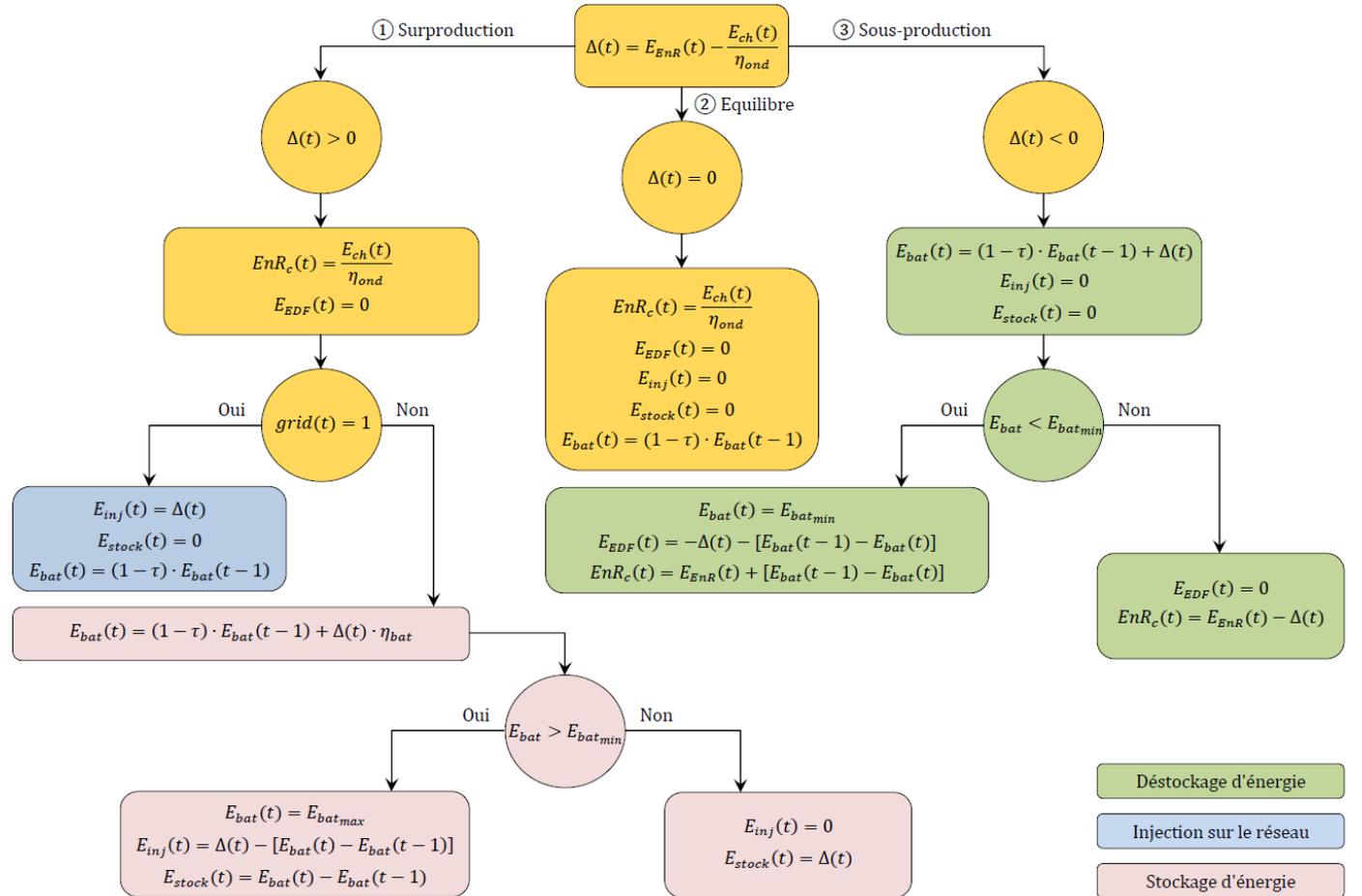


Fig. 2. Gestion instantanée de la production décentralisée avec prise en compte de l'état du réseau électrique

La figure 4 présente la consommation annuelle du système de chauffage et de climatisation qui équipe l'habitat, une consommation négative (resp. positive) correspondant à un fonctionnement en mode chauffage (resp. climatisation). Les

modèles développés ont pu être validés grâce à des données recueillies sur site (l'habitat réel instrumenté). Enfin, notons que la production et la consommation d'énergie sont impactées par différentes contraintes géographiques, climatiques et

physiques. Celles-ci sont directement intégrées aux différents modèles via la localisation, l'orientation de l'habitat et des systèmes de production ainsi que le niveau d'isolation de ce dernier. Meteonorm [16] permet également d'intégrer les contraintes climatiques, des données météorologiques étant disponibles pour différentes villes et différents pays.

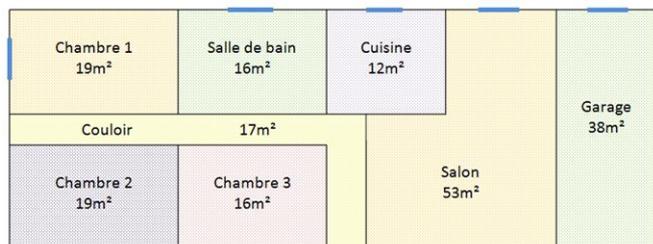


Fig. 3. Plan de l'habitat individuel modélisé

TABLE II  
CARACTÉRISTIQUES DE L'HABITAT INDIVIDUEL

Élément	Matériau	Épaisseur [m]	$U$ [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]	$U_{RT2005}^{max}$ [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]
Mur extérieur	BA13	0,013	0,602	0,45
	Laine de roche	0,06		
	Parpaing	0,2		
	Enduit extérieur	0,02		
Mur intérieur	BA13	0,013	0,845	-
	Laine de verre	0,04		
	BA13	0,013		
Sol	Carrelage	0,022	0,415	0,4
	Mortier	0,05		
	Béton lourd	0,16		
	Polystyrène expansé	0,08		
Plafond	BA13	0,013	0,196	0,34
	Laine de verre	0,1		
	Lame d'air	0,5		
Plafond garage	Terre cuite	0,01	2,37	0,34
	BA13	0,013		
Fenêtre	Double vitrage	0,2	1,43	2,6

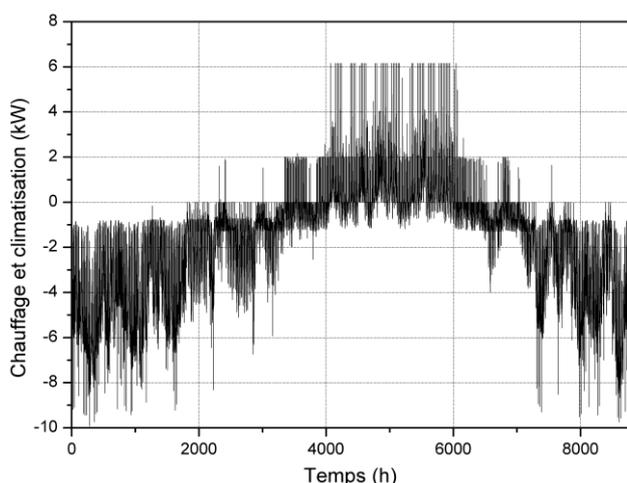


Fig. 4. Consommation annuelle (puissance) due au chauffage et à la climatisation de l'habitat individuel modélisé (2006)

### B. Modélisation de la batterie

Le modèle proposé décrit le fonctionnement de la batterie, c'est-à-dire les phases de charge et de décharge. L'état de la batterie à chaque instant est lié à son état antérieur (instant  $t - 1$ ) ainsi qu'à la production et à la consommation d'énergie du système à l'instant  $t$ . Ainsi, deux équations permettent d'en décrire le fonctionnement. La capacité de la batterie en mode

charge (respectivement en mode décharge) à l'instant  $t$  est donnée par (9) (respectivement (10)) :

$$E_{bat}(t) = (1 - \tau) \cdot E_{bat}(t - 1) + \left( E_{ENR}(t) - \frac{E_{ch}(t)}{\eta_{ond}} \right) \cdot \eta_{bat} \quad (9)$$

$$E_{bat}(t) = (1 - \tau) \cdot E_{bat}(t - 1) + \left( \frac{E_{ch}(t)}{\eta_{ond}} - E_{ENR}(t) \right) \quad (10)$$

avec  $\eta_{ond}$  le rendement de l'onduleur,  $\eta_{bat}$  le rendement de charge de la batterie,  $E_{bat}$  l'énergie stockée dans la batterie,  $E_{ch}$  l'énergie demandée par la charge,  $E_{ENR}$  l'énergie produite par le système de production décentralisé, en tenant compte des pertes du contrôleur, et  $\tau$  le taux horaire d'autodécharge, égal à  $10^{-4}$ . Pendant la charge de la batterie, le rendement est supposé constant et égal à 85%. Pendant la décharge, il est égal à 1%. L'utilisation de l'énergie stockée dans la batterie est nécessaire dès que la production locale est insuffisante pour satisfaire la demande. A contrario, de l'énergie est stockée dès que la production excède la demande. Cependant, il est à noter que, dans le cas d'une puissance de charge ou de décharge supérieure à ce qui est disponible, la batterie ne fournira que ce qui est disponible. Ainsi, à chaque instant, la charge de la batterie est soumise aux contraintes suivantes :

$$E_{bat_{min}} \leq E_{bat}(t) \leq E_{bat_{max}} \quad (11)$$

Ici, la capacité maximale de la batterie ( $E_{bat_{max}}$ ) est égale à la capacité nominale de la batterie et sa capacité minimum,  $E_{bat_{min}}$ , est déterminée par la profondeur de décharge ( $DOD$ ) :

$$E_{bat_{min}} = (1 - DOD) \times E_{bat_{max}} \quad (12)$$

Selon les fabricants, la durée de vie des batteries peut être maximisée pour une profondeur de décharge comprise entre 30 et 50 % [1]. Ainsi, une  $DOD$  de 50 % est considérée.

## IV. GESTION DES RESSOURCES ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES DE PRODUCTION ET DE STOCKAGE

### A. Étude paramétrique pour un dimensionnement optimal

La stratégie de gestion proposée dans la première partie de cet article a été appliquée au cas d'étude présenté en suivant (partie III). Une étude paramétrique a été menée, grâce aux modèles développés, afin d'optimiser le dimensionnement des panneaux photovoltaïques installés (la puissance installable est limitée par la superficie et l'orientation de la toiture de l'habitat, soit un maximum de 8 kWc) ainsi que la capacité de la batterie (cette capacité est limitée par l'encombrement relatif à l'installation, soit  $2 m^3$ , ce qui aboutit à un maximum de 200 kWh, compte tenu du rapport volume/puissance). L'objectif est ainsi de maximiser la fonction objectif choisie,  $J_{ENR}$ , pour différentes valeurs du seuil réseau, en tenant compte au cours du processus d'optimisation de l'état de ce réseau. Ainsi, plusieurs configurations remarquables sont proposées, sur la base d'une stratégie de gestion s'appuyant ou non sur la présence d'un système de stockage.

### B. Analyse des résultats obtenus

Les deux premières configurations retenues sont présentées par la table III. La configuration 1 est fondée sur un dimensionnement standard (puissance PV installée de 3 kWc), sans système de stockage. La configuration 2 s'appuie sur le dimensionnement du système de production, toujours sans système de stockage, maximisant le critère  $J_{ENR}$ . L'évaluation de ces configurations montre que, comparativement à une

installation PV standard de 3 kWc, une installation justement dimensionnée de 6,9 kWc permet d'augmenter la quantité d'énergie autoconsommée de 61,7 % et de diminuer la quantité d'énergie soutirée au réseau de 7,8 %, ce qui permet de réduire la facture énergétique annuelle de presque 25 % (310 €). On observe, dans ce cas, un lissage des courbes (figures 5 et 6).

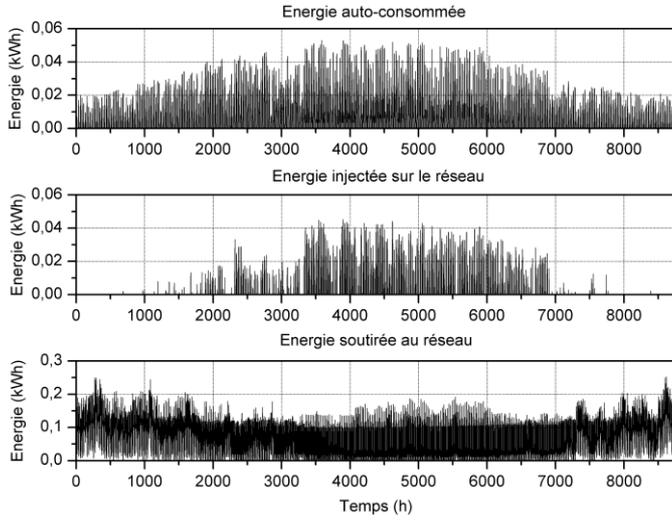


Fig. 5. Gestion annuelle de l'énergie sans système de stockage, avec une puissance PV installée standard de 3 kWc (configuration 1)

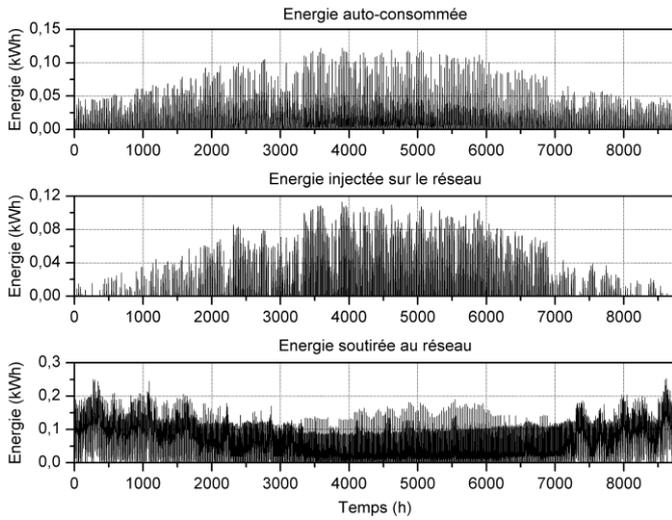


Fig. 6. Gestion annuelle de l'énergie sans système de stockage, avec une puissance PV installée de 6,9 kWc (configuration 2)

TABLE III  
CONFIGURATIONS 1 & 2, SANS SYSTÈME DE STOCKAGE

PV (kWc)	3	6,9
$E_{nR_c}$ (kWh)	3306	5345
$E_{inj}$ (kWh)	1132	4861
$E_{EDF}$ (kWh)	26078	24038
$\%_{AC}$ (%)	74,49	52,38
$\%_{E_{nR_c}}$ (%)	11,25	18,19
$J_{ENR}$ (%)	8,14	9,53
$J_{coût}$ (€)	-1262	-953

Les configurations 3A, 3B et 3C, présentées par la table IV, s'appuient sur un dimensionnement optimal des systèmes de production et de stockage maximisant  $J_{ENR}$  et tenant compte de l'impact de l'habitat sur le réseau électrique via  $I_{inj}$ ,  $I_{sout}$  ou  $I_g$ . Trois seuils réseau sont considérés (26 %, 43 % et 79 %). A titre de comparaison, les performances obtenues sans système de stockage sont précisées entre parenthèses.

TABLE IV  
CONFIGURATIONS 3A, 3B & 3C, AVEC (SANS) SYSTÈME DE STOCKAGE

Seuil réseau (%)	26	43	79
PV (kWc)	7,5	4,2	4,2
$C_{Bat}$ (kWh)	105	(-)	200
$E_{nR_c}$ (kWh)	5610 (5570)	4130 (4081)	4091 (4081)
$E_{inj}$ (kWh)	5473 (5523)	2073 (2132)	2117 (2132)
$E_{EDF}$ (kWh)	23773 (23813)	25253 (25302)	25293 (25302)
$E_{stock}$ (kWh)	49,8 (-)	58,5 (-)	14,3 (-)
$\%_{AC}$ (%)	50,57 (50,21)	66,48 (65,69)	65,85 (65,69)
$\%_{E_{nR_c}}$ (%)	19,09 (18,96)	14,06 (13,89)	13,92 (13,89)
$J_{ENR}$ (%)	9,66 (9,52)	9,35 (9,12)	9,17 (9,12)
$J_{coût}$ (€)	-905 (-905)	-1167 (-1167)	-1167 (-1167)
$I_{inj}$ (-)	3306 (3290)	1044 (1028)	0 (-0,2)
$I_{sout}$ (-)	-3310 (-3326)	1 (-17)	8768 (8767)
$I_g$ (-)	-4 (-36)	1045 (1011)	8768 (8756)

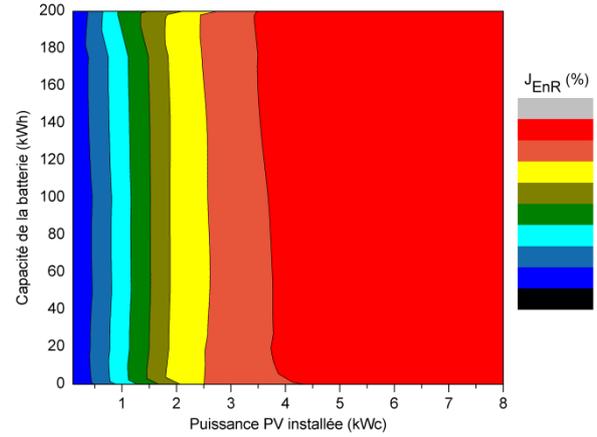


Fig. 7. Impact de la puissance PV installée et de la capacité de la batterie sur  $J_{ENR}$ , pour un seuil réseau de 43 % (configuration 3B)

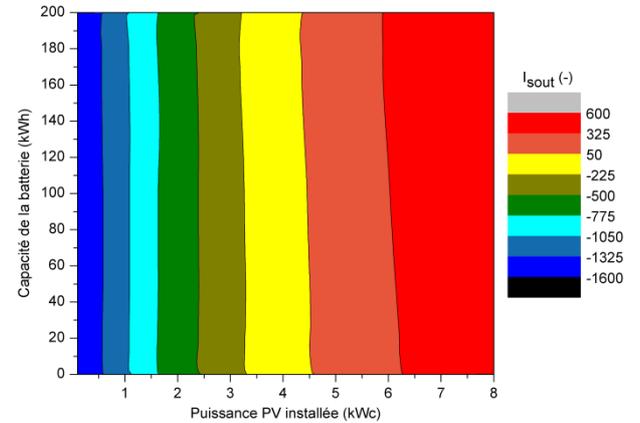


Fig. 8. Impact de la puissance PV installée et de la capacité de la batterie sur  $I_{sout}$ , pour un seuil réseau de 43 % (configuration 3B)

La configuration 3A a un impact global quasi nul sur le réseau électrique. Le seuil réseau est de 26 %, la batterie est de taille moyenne et les panneaux solaires d'une surface importante. Avec cette configuration, le réseau électrique étant très demandeur (le seuil réseau est faible), l'injection a un impact positif qui compense complètement l'impact négatif dû au soutirage. Avec la seconde configuration (3B, seuil réseau de 43% et batterie de faible capacité), la puissance PV installée est réduite (4.2 kWc). L'objectif est ici de déterminer une configuration pour laquelle l'achat d'électricité n'impacte pas négativement le réseau électrique. Les figures 7 et 8 présentent l'impact de la capacité de la batterie et de la puissance PV installée sur  $J_{ENR}$  et  $I_{sout}$ , pour ce seuil réseau. Comme le montrent ces figures, l'impact de la capacité de la

batterie est ici limité. L'autoconsommation, l'injection et le soutirage réseau sont présentés par la figure 9. La troisième configuration (3C, seuil réseau élevé donc réseau électrique peu demandeur) met en avant un dimensionnement des systèmes n'engendrant pas d'impact négatif sur le réseau lorsque l'électricité produite localement y est injectée. En comparant les résultats obtenus avec et sans batterie, on observe que cette dernière permet une légère augmentation de la quantité d'énergie autoconsommée, mais n'influe pas sur la facture énergétique. Toutefois, elle permet dans une certaine mesure, assez limitée en raison de ses caractéristiques, de pallier à l'intermittence de la production locale et de mieux gérer l'énergie, c'est-à-dire d'injecter sur le réseau électrique ou de lui soutirer de l'énergie aux moments les plus favorables.

En raison du faible impact de la batterie, les configurations 4A, 4B et 4C (table V) s'appuient uniquement sur le juste dimensionnement du système de production (pas de stockage) et maximisent  $J_{EnR}$ , en tenant compte de l'impact sur le réseau électrique (les seuils réseau sont inchangés). Les configurations obtenues sont proches des configurations 3A, 3B et 3C sauf si l'on vise un impact faible en injection (config. 4C), la puissance PV installée étant alors bien plus faible (2,1 contre 4,2 kWc).

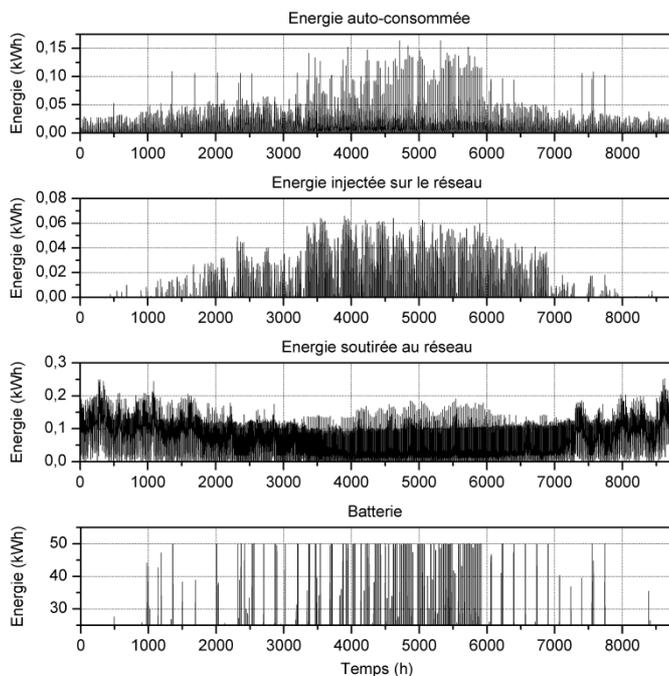


Fig. 9. Gestion annuelle de l'énergie avec une batterie de 50 kWh, une puissance PV installée de 4,2 kWc et un seuil réseau de 43 % (configuration 3B)

## V. CONCLUSION

Une approche globale et multicritère de gestion énergétique, à l'échelle d'un habitat individuel, est proposée pour optimiser l'utilisation de la production locale ainsi que l'interaction entre le bâtiment et le réseau électrique, par l'intermédiaire de l'achat et de la vente d'électricité. L'application de cette stratégie ainsi que le juste dimensionnement des systèmes intégrés au bâti (des panneaux solaires photovoltaïques et un système de stockage) ont montré qu'il était possible de réduire les coûts économiques, de favoriser l'autoconsommation et d'obtenir un bon taux de couverture EnR, tout en assurant un impact positif ou nul sur le réseau électrique. Ceci autorise une meilleure adéquation entre production locale, besoins énergétiques et injection sur le réseau électrique.

Les travaux à venir porteront sur le développement d'un contrôleur prédictif permettant d'affiner la stratégie de gestion proposée et, notamment, l'utilisation du système de stockage, grâce à l'anticipation de la disponibilité des ressources ainsi que des besoins énergétiques. Par ailleurs, il sera tenu compte, conjointement à l'énergie solaire, de l'énergie éolienne comme ressource. Enfin, l'impact de la situation géographique, de la performance thermique du bâtiment et des habitudes de ses occupants sera également pris en considération.

TABLE V  
CONFIGURATIONS 4A, 4B & 4C, SANS SYSTÈME DE STOCKAGE

Seuil réseau (%)	26	43	79
PV (kWc)	7,8	4,3	2,1
$E_{nR_c}$ (kWh)	5677	4138	2565
$E_{inj}$ (kWh)	5860	2222	541
$E_{EDF}$ (kWh)	23707	25245	26819
% $_{AC}$ (%)	49,20	65,06	82,57
% $_{EnR_c}$ (%)	19,32	14,08	8,73
$J_{EnR}$ (%)	9,51	9,16	7,21
$J_{coût}$ (€)	-881	-921	-1334
$I_{inj}$ (-)	3,5	1071	0,01
$I_{sout}$ (-)	3,5	3	8931
$I_g$ (-)	0	1075	8930

## RÉFÉRENCES

- [1] Ai B., Yang H., Shen H., Liao X., Computer-aided design of PV/Wind hybrid system, *Renewable Energy* 28 (10) (2003) 1491-1512.
- [2] Alvarez-Herault M.-C., Architecture des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 2009.
- [3] D. Boëda, Etude de la contribution du pilotage de charges à la fourniture de services aux réseaux Electriques, Thèse de doctorat, INP Grenoble, soutenue le 27 février 2009.
- [4] Carrière P., Réseaux de distribution - Structure et planification, *Techniques de l'ingénieur*, n°D4210, décembre 1991.
- [5] D. Coll-Mayor, M. Paget, E. Lightner, Future intelligent power grids: Analysis of the version in the European Union and the United States, *Energy Policy* 35 (4) (2007) 2453-2465.
- [6] Courtecuisse V., Supervision d'une centrale multi-source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique, Thèse de doctorat, ENSAM, novembre 2008.
- [7] CSTB, Méthode de calcul TH-CE 2005, mars 2006.
- [8] European Technology Platform SmartGrid, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, 2006.
- [9] Fontela Garcia M.A., Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, juillet 2008.
- [10] GIMELEC, Livre Blanc sur les Réseaux Electriques Intelligents, 2010.
- [11] D.-L. Ha, Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation, Thèse de doctorat, INP Grenoble, soutenue le 19 septembre 2007.
- [12] Kolokotsa D., Niachou K., Geros V., Kalaitzakis K., Stavrakakis G.S., Santamouris M., Implementation of an integrated indoor environment and energy management system, *Energy and Buildings* 37 (2005) 93-99.
- [13] Legifrance, Arrêté du 24/05/2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.
- [14] E. Le Pelleter, Outils d'électronique de puissance pour le maillage-bouclage des réseaux de distribution: application au contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de court-circuit", Thèse de doctorat, INP Grenoble, soutenue le 26 octobre 2007.
- [15] Mathews E.H., Arndt D.C., Piani C.B., Heerden E., Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort, *Applied Energy* 66 (2000) 135-159.
- [16] Meteonorm, www.meteonorm.com.
- [17] Pham T.T.H., Influences de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissances, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, octobre 2006.
- [18] Puret C., Les réseaux de distribution publique MT dans le monde, *Cahier Technique Schneider Electric* 155, septembre 1991.
- [19] TRNSYS, www.trnsys.com.
- [20] Union Française de l'Electricité, Rapport du GT "Réseaux intelligents", mai 2010.