

# Gestion des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque

Duy Long Ha \* Stéphane Ploix \*, Eric Zamai \* et Seddik Bacha \*\*  
 \* G-SCOP, INPGrenoble, UJF, CNRS, 46 avenue Félix Viallet 38031  
 Grenoble Cedex, France duy-long.ha, stephane.ploix, eric.zamai@g-scop.fr  
 \*\* G2ELab, ENSIEG -BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France  
 seddik.bacha@g2elab.inpg.fr

## Abstract

Cet article se concentre sur une application de gestion de l'énergie dans l'habitat conçue dans le cadre du projet industriel ANR Multisol. Ce projet est né d'une collaboration entre différents partenaires : l'INES/CEA, Schneider Electric, le laboratoire G2ELab, le laboratoire G-SCOP et Armines. Ce projet vise à la mise en place d'un système de gestion d'énergie dans le bâtiment pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire produite par des panneaux photovoltaïques. En tant que partenaire de ce projet, nous transférons une partie des nos travaux de recherche pour proposer des algorithmes qui vont être intégrés au module de pilotage réactif et prédictif de Multisol. L'application présentée dans cet article correspond à une simulation sur un cas d'étude choisi pour valider, dans un premier temps, nos résultats de recherche.

## I. PRÉSENTATION DU PROJET MULTISOL

Le projet ANR Multisol s'intéresse aux bâtiments photovoltaïques raccordées au réseau avec une vision moyen terme où les tarifs de rachat de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est favorable. Le projet adopte aussi une vision à moyen terme où les tarifs de rachat peuvent être revus à la baisse ou encore disparaître. A cet effet, le bâtiment aura peu d'intérêt à réinjecter l'énergie produite, mais devra plutôt la consommer localement de manière intelligente en favorisant certaines charges au détriment d'autres en cas de manque ou valoriser l'énergie produite en la partageant avec d'autres bâtiments ou avec le réseau quand il y a surplus.

Le consortium constitué autour de ce projet réunit des compétences complémentaires : électrotechnique, solaire photovoltaïque, supervision et contrôle-commande. Pour conforter l'ensemble, ce projet s'appuie sur les moyens techniques des démonstrateurs de l'Institut National de l'énergie Solaire (INES/CEA).

### A. Architecture matérielle

Aujourd'hui, lorsque l'on modifie une installation pour y ajouter un générateur photovoltaïque, l'onduleur peut être raccordé sur une des sorties disponibles du coffret de distribution. Il existe dès lors une possibilité de rencontrer des courants qui remontent vers le réseau de distribution ce qui va à l'inverse des habitudes de câblage actuelles. Cet aspect perturbe non seulement les électriciens qui doivent reprendre leurs méthodes de calcul qui n'étaient pas prévues pour traiter ce type de configuration mais aussi et surtout les contrôleurs chargés d'attester la conformité électrique des installations.

D'un autre côté, en passant à une production multi-sources, le schéma à un seul bâtiment s'avère compliqué, peu évolutif voire dangereux et donc coûteux en travaux d'études et de réalisation. En conséquence, le système de raccordement électrique entre bâtiment et réseau doit avoir une architecture matérielle appropriée.

L'idée proposée par [1] est de séparer les composants liés à la production électrique dans un coffret ou un boîtier séparé dit de "Production" qui alimentera une armoire de distribution plus traditionnelle. Le réseau, les groupes électrogènes et autres sources complémentaires apparaissent alors comme des générateurs d'appoint du solaire. En sortie de cet ensemble, un module de gestion doit permettre le pilotage et le couplage de ces sources en fonction des charges. Les sources DC disposent de convertisseurs DC/AC réglés pour optimiser le point de fonctionnement du générateur tout en respectant les contraintes de tension imposées par les onduleurs. Nous tenons compte de l'aspect redondant de l'onduleur notamment pour renforcer la sécurité de l'application. Le boîtier de production d'énergie dispose également d'un système de connexion qui permet de mesurer l'énergie propre revendue au réseau et l'énergie importée du réseau. Le système de gestion des charges dans le bâtiment peut être situé dans une armoire traditionnelle (voir la figure 1) qui permet de placer le système de contrôle-commande au plus près des lignes.

Concernant l'architecture matérielle du système de pilotage, plusieurs solutions sont proposées. Un module communiquant peut être intégré dans une prise électrique intelligente, qui intègre une interface de communication entre l'équipement et le système de pilotage. Cette interface de communication permet de récupérer d'une part les informations disponibles sur l'équipement correspondant et d'autre part d'exécuter la commande envoyée par le module de pilotage. Cette architecture est modulaire avec des interfaces standardisées permettant l'interchangeabilité et l'évolutivité des composants du système.

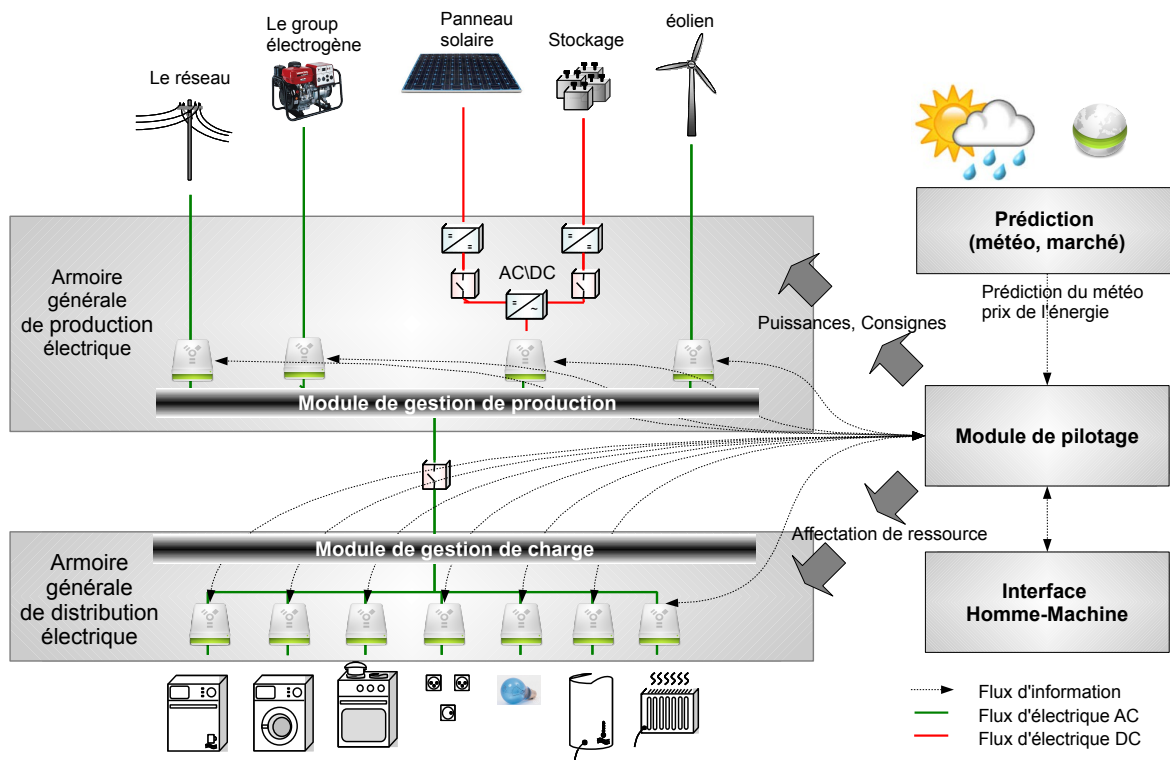


Fig. 1. Architecture matérielle de Multisol

L'avantage de cette architecture est qu'elle est adaptée au contexte actuel dans lequel les logements anciens représentent 66% de la totalité des logements en France avec un taux de renouvellement de l'habitat de l'ordre de 1% par an. Dans les bâtiments neufs aujourd'hui, la réglementation exige un câble par équipement. Dans ce contexte, le module de pilotage peut être situé au niveau du tableau électrique. De plus, dans un contexte plus futuriste, on peut imaginer que les fabricants de gros équipements (chauffage, cuisson, éclairage, électro ménager...) intègrent directement un module communiquant de contrôle-commande dans leurs systèmes de commande locale existants. Bien entendu, des solutions mixtes avec des modules de contrôle/ commande dans des prises intelligentes, au tableau électrique et dans les systèmes de commande locale existant peuvent être conçues. La distribution géographique du système de contrôle/commande n'a pas d'impact sur les algorithmes utilisés. Néanmoins, l'architecture logicielle de l'application doit s'y prêter.

### B. Architecture logicielle

Nous proposons une architecture logicielle du système composée de différents composants logiciels. Les composants logiciels ont été définis pour conduire à des macros composants standard structurés en couche. Les interfaces de communication des composants sont identiques, les interfaces et les messages échangés entre les composants sont standardisés.

Nous reprenons l'architecture de pilotage introduite dans [2], composée de trois couches de commande. La couche d'anticipation est chargée de prévoir la demande en énergie et les capacités de production. Elle détermine un plan d'affectation de la ressource énergie en coordonnant la consommation et la production. La couche réactive ajuste le plan calculé en absorbant des incertitudes de prédiction et les perturbations.

Le solveur est un organe qui est chargé d'effectuer les calculs d'optimisation du système. Il optimise la gestion des flux d'énergie dans l'habitat. Le fonctionnement du solveur est périodique, il peut aussi être déclenché par un service si le plan doit être remis en cause ou par une nouvelle prédiction météorologique ou encore une nouvelle programmation d'équipement. Pour réaliser les optimisations, les informations suivantes sont nécessaires :

- Chaque variable et ses caractéristiques
  - Est-elle partagée ? (globale ou locale à l'équipement)
  - Est-elle constante ? (Cherche-t-on à déterminer la valeur optimale de cette variable ou est-ce une donnée du problème ?)
  - Quel est son domaine de valeurs ? (binaire/entier/continu)
- La contribution à la fonction objectif (on minimise la somme de ces contributions)
- Un ensemble de contraintes sur ces variables

Pour pouvoir récupérer l'ensemble de ces informations avant chaque nouvelle optimisation, il est nécessaire de définir un protocole. Chaque composant utilisant le solveur devra s'enregistrer auprès du solveur selon un pattern de type " observer



Fig. 2. Le plan de l'appartement cible

”, le solveur interrogera ensuite l'ensemble des macro-composants correspondants à des services enregistrés avant chaque optimisation.

Le module de pilotage est chargé de coordonner les charges avec les sources d'énergie. Chaque macro-composant de service doit être capable d'anticiper l'évolution de la consommation ou de la ressource disponible. A travers l'interface de communication, le module de pilotage va récupérer les modèles de différents services. Le plan d'affectation de la ressource est calculé par l'algorithme prédictif. Pour valoriser les résultats de recherche, nous sommes en train d'implémenter les mécanismes de pilotage qui sont présentés dans [3] pour le projet Multisol.

1) *Interface Homme-Machine*: Le système de gestion d'énergie est muni d'une Interface Homme-Machine permettant les ajustements de paramètres de confort, la renégociation avec l'utilisateur en cas d'échec du calcul du plan d'affectation et la restitution d'un tableau de bord incitatif à la réduction de la consommation. Cette interface joue le rôle de récupération des consignes de l'utilisateur sur la pré-programmation, par exemple la période d'occupation du bâtiment et les températures de consigne. Le suivi de la consommation doit également apparaître sur cette interface graphique.

2) *Macro-Composant de prévision*: Ces modules sont utilisés par les services pour acquérir des informations depuis l'extérieur (et donc, principalement pour construire les contraintes pour le solveur) via Internet ou le réseau GSM pour la communication avec l'utilisateur par exemple. Les informations collectées sont diverses :

- Météo
- Coût de l'énergie
- Comportement de l'utilisateur

## II. CAS D'ÉTUDE

Dans le cadre de Multisol, afin de valider les résultats préliminaires de notre projet, on choisit un cas d'étude représentatif d'un habitat usuel. Ce cas d'étude est simulé par le simulateur temps réel développé dans [1]. Il s'agit d'un appartement d'une surface habitable de 109.25 m<sup>2</sup>, composé de 4 chambres, un salon, une cuisine, une salle de bain et un garage (voir le plan de l'appartement cible dans la figure 2). Les services disponibles dans la maison sont donnée par le tableau I.

### A. Services disponibles dans l'appartement cible

Pour illustrer les résultats de l'optimisation des flux électriques dans le bâtiment, on a choisi un appartement dans lequel la plupart des services sont alimentés par de l'énergie électrique. Les services disponibles dans l'appartement sont présentés dans le tableau I. Le mécanisme de pilotage doit effectuer un plan d'affectation des ressources d'énergie 24h à l'avance, le temps de discrétisation est  $\Delta_a = 1h$ .

Nom	Puissance max	Pilotable	Modélisé comme
chauffage	7kW	Oui	Service permanent
chauffe-eau	1.5kW(150 litres)	Oui	Service temporisé préemptible
machine à laver	2,1kW	Oui	Service temporisé non-préemptible
lave linge	1,6kW	Oui	Service temporisé non-préemptible
table de cuisson	2×1,5kW+2×1kW	Oui	Service temporisé non-préemptible
réfrigérateur	0,12kW	Oui	Service permanent
congélateur	0,21kW	Oui	Service permanent
télévision	0,6kW	Non	
éclairage	1,2kW	Non	

TABLE I  
LISTE DES ÉQUIPEMENTS DISPONIBLE DANS LA MAISON

1) *Service de chauffage*: Le service de chauffage est assuré par 4 radiateurs électriques de 1kW, un dans chaque chambre, un radiateur de 2kW pour le salon. Dans la salle de bain, on considère qu'un radiateur soufflant est utilisé lorsque l'utilisateur entre dans la salle de bain. Le modèle thermique d'une pièce est donné par le modèle à deux constantes de temps présenté dans [4] :

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_m}{dt} \\ \frac{dT_a}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_i C_e} & \frac{1}{r_i C_e} \\ \frac{1}{r_i C_i} & -\frac{1}{r_a C_i} - \frac{1}{r_i C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m \\ T_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_a C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{W}{C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

Avec

- $T_m$  la température de l'enveloppe de la pièce
- $T_a$  la température ambiante de la pièce
- $T_{ext}$  la température extérieure
- $\phi_r$  le flux thermique généré par le radiateur
- $\phi_s$  le flux énergétique apporté par le rayonnement solaire
- $C_e$  la capacité thermique de l'enveloppe de la pièce
- $C_i$  la capacité thermique du volume d'air dans la pièce
- $r_i, r_a$  les résistances thermiques
- $W$  la superficie de la fenêtre

$Srv(1), Srv(2), Srv(3), Srv(4)$  correspondent aux services de chauffages de 4 chambres,  $Srv(5)$  correspond au service chauffage de salon. La sensation thermique est modélisée par le système d'inéquations mixtes introduites dans [5], la température optimale choisie est de  $T_{opt} = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{min} = 18^\circ\text{C}$ ,  $T_{max} = 22^\circ\text{C}$ . En sachant que l'appartement est occupé durant deux périodes de la journée : la première période est  $[0h, 8h]$  et la seconde période est entre  $[17h, 24h]$ . Le critère de confort thermique est pris en compte lorsque le bâtiment est occupé. Cela permet de réduire significativement le nombre de variables binaires qu'il faut ajouter. Nous ajoutons donc 15 variables binaires  $\delta(i, k)$  par service de chauffage qui permettent de décrire la sensation thermique dans une période  $k$  sous la forme :

$$\begin{aligned} |PMV(T_a(i, k))| &= \delta_a(i, k) \times 0,5(T_a(i, k) - T_{opt}) + (1 - \delta_a(i, k)) \times 0,5(T_{opt} - T_a(i, k)) \\ &\quad \forall i \in \{1, \dots, 5\}, k \in \{0, \dots, 18, 17, \dots, 24\} \\ &= F_1 \delta_a(i, k) + F_2 T_a(i, k) + F_3 T_a(i, k) \times \delta_a(i, k) + F_4 \\ &\quad \forall i \in \{1, \dots, 5\}, k \in \{0, \dots, 18, 17, \dots, 24\} \\ &= F_1 \delta_a(i, k) + F_2 T_a(i, k) + F_3 z_a(i, k) + F_4 \\ &\quad \forall i \in \{1, \dots, 5\}, k \in \{0, \dots, 18, 17, \dots, 24\} \end{aligned} \quad (2)$$

La variable semi-continue  $z_a(i, k)$  est utilisée pour  $z_a(i, k) \triangleq T_a(i, k) \times \delta_a(i, k)$ . Le critère de satisfaction du service de chauffage est écrit sous la forme

$$U(i) = \sum_{k=1}^K \frac{|PMV(T_a(i, k))|}{24} \quad \forall i \in [1, \dots, 5] \quad (3)$$

2) *L'eau chaude sanitaire*: L'eau chaude sanitaire est fournie par le chauffe-eau qui a une puissance maximale de 1,5kW. Le besoin en eau chaude est estimé selon le tableau [6]. Supposons que l'appartement est équipé d'un évier, d'un lavabo et une petite baignoire. Le besoin en eau chaude dans une journée est :

$$E_e = 2,0 + 1,3 \times N = 2,0 + 1,3 \times 5 = 8,5kWh \quad (4)$$

Nous faisons l'hypothèse que la consommation du service de chauffe-eau peut être découpée en respectant la contrainte d'accumulation suffisante pour couvrir à tout moment le besoin en eau chaude de la journée. Le service en eau chaude est donc modélisé par un service préemptible qui a un horizon temporel couvrant toute la journée :

$$\sum_{k=1}^K E(6, k) = E_e \quad (5)$$

La contrainte sur la puissance consommée maximale de chauffe-eau est :

$$E(6, k) \leq 1500 \forall k \in [1, \dots, 24] \quad (6)$$

3) *Service de lave-linge*: Le service de lave-linge  $Srv(7)$  assuré par la machine à laver est modélisé comme un service temporisé. En effet, selon [7]. La modélisation du comportement énergétique de la machine à laver est composée de trois phases : le phase chauffage de l'eau, la phase de lavage et la phase d'essorage. On considère que la machine à laver a été programmée avec un cycle à 90°C. La puissance consommée dans la phase de chauffage est de 92% de l'énergie totale consommée, 4% pour la phase de lavage et 4% pour la phase de l'essorage. La puissance consommée maximale dans la phase de chauffage est fixée à 98% de la puissance maximale (donnée par la notice d'un composant constructeur) et durant 1h.

Le modèle comportemental du service du lave-linge est finalement modélisé par un automate à état en trois états différents. Un état de l'automate correspond à un sous-service temporisé  $Srv(7, j)$ ,  $j \in [1, 2, 3]$ . Nous considérons que le service de lave-linge est un service non-préemptif. En conséquence, le fonctionnement des trois phases doit s'enchaîner. Cela est modélisé par les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} s(7, 2) &= f(7, 1) \\ s(7, 3) &= f(7, 2) \end{aligned} \quad (7)$$

La demande du service du lave-ligne est définie par différents paramètres. Le service doit se terminer dans la fenêtre de temps [9h, 16h], la date de fin souhaitée de l'utilisateur est 10h. On ajoute une variable binaire  $\delta_u(7)$  qui est chargée de distinguer le retard ou l'avance du service de lavage. En sachant que le critère de satisfaction du service ne dépend que de la date de fin du service de lave-linge :

$$U(i) = \delta_u(7) \times (f_{opt}(7) - f(7, 3)) + (1 - \delta_u(7)) \frac{f(7, 3) - f_{opt}(i)}{6} \quad (8)$$

Pour compléter cette transformation, nous devons ajouter une variable semi-continue  $z_u(7) \triangleq f(7, 3) \times \delta_u(7)$ . La transformation équivalente de  $z_u(7)$  se trouve dans [5].

La formulation mathématique de chaque sous-service temporisé  $Srv(7, j)$  est expliqué dans [5]. Considérons le sous-service  $Srv(7, 1)$  en guise d'illustration :

$$s(7, 1) \in [f_{min}(7) - d(7, 3) - d(7, 1), f_{max}(7) - d(7, 3) - d(7, 1)] = [7, 5h, 14, 5h] \quad (9)$$

$$f(7, 1) \in [8, 5h, 15, 5h] \quad (10)$$

avec  $d(i, j)$  la durée du sous-service  $Srv(i, j)$ .

La transformation liée à la période temporelle  $\Delta_a = 1h$  nécessite d'ajouter les variables binaires  $[\delta_{t1}(i, j, k)] \leftrightarrow [f(7, 1) \leq k\Delta_a]$ .  $[\delta_{t2}(i, j, k)] \leftrightarrow [f(7, 1) \leq k\Delta_a]$ . Le nombre de variables  $\delta_{t1}(i, j, k)$  et  $\delta_{t2}(i, j, k)$  est égal à 14. L'énergie moyenne consommée dans la phase 1 s'écrit sous la forme :

$$E(7, j, k) = \begin{cases} E'(7, j, k) = P_{max}(7) (\text{Min}[f(7, j), (k+1)\Delta] - \text{Max}[s(7, j), k\Delta]) & \text{Si } E'(i, j, k) > 0 \\ 0 & \text{Si } E'(7, j, k) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Finalement, la formulation est complétée par la transformation de (11) en forme mixte linéaire en ajoutant la variable binaire  $[\delta_{t3}(i, j, k)] \leftrightarrow [E'(7, j, k) \leq 0]$ . Le nombre de variables binaires  $\delta_{t3}(i, j, k)$  est égal au nombre de périodes d'anticipation durant lesquelles  $E'(7, j, k)$  peuvent être positives. Ainsi, la période active de  $Srv(7, 1)$  est  $[s_{min}(7, 1), f_{max}(7, 1)]$ , le nombre de variables  $\delta_{t3}(i, j, k)$  est de 8 variables :

$$E(7, j, k) = (1 - \delta_{t3}(i, j, k))E'(7, j, k) \quad (12)$$

La consommation du service  $Srv(i)$  est la somme de la consommation de tous ses sous-services en utilisant au total 69 variables binaires :

$$E(7, k) = \sum_{j=1}^3 E(7, j, k) \forall k \in [1, \dots, K] \quad (13)$$

4) *Service du lave vaisselle*: Le service du lave-vaisselle  $Srv(8)$  est modélisé de la même manière que le service de lave-linge  $Srv(7)$ . Le fonctionnement composé de trois phases différentes :

- selon le rapport Ciel [8], la phase de chauffage de l'eau absorbe 70% l'énergie totale consommée.
- 30% de l'énergie est utilisée pour le lavage à l'eau froide
- la campagne de mesure de Ciel [9] a montré que la consommation d'un lave-vaisselle est de l'ordre de 1,93 kWh durant 90 minutes.

La formulation du service de lave-vaisselle se base sur un automate à l'état à trois états, chaque état correspondant à un service temporisé.

5) *Les sources d'énergie électrique*:

a) *Le fournisseur d'énergie*: On fait l'hypothèse que la maison bénéficie d'un abonnement souscrit de 6kW avec l'option heures creuses et heures pleines. Ce service de source permanente est noté  $Srv(9)$ . La contrainte de capacité de source est écrite sous la forme :

$$E(9, k) \leq 6 \forall k \in [1, \dots, K] \quad (14)$$

Le coût d'achat de l'énergie électrique est  $C(9, k)$ , égal à 0,0654 € durant la période creuse ([2h, 7h] et [12h, 15h]) et 0,1074 € durant la période pleine

b) *Les panneaux solaires*: Sur le toit de la maison et sur le garage on dispose d'une surface de 147,47 m<sup>2</sup>. On peut mettre un système des panneaux photovoltaïques de 100 m<sup>2</sup>. La puissance générée correspond à 10% de l'énergie solaire rayonnée. Ce service est considéré comme un service de source locale intermittente noté  $Srv(10)$ .

c) *Le service de vente d'énergie au réseau*: L'énergie produite par les panneaux solaires peut être réinjectée sur le réseau lorsque la consommation est moindre que la production locale. L'utilisateur peut choisir un raccordement en mode parallèle qui permet de revendre la totalité de l'énergie produite au réseau et importer de l'électricité du réseau pour la consommation locale.

Nous étudions deux stratégies d'utilisation de la ressource d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Dans le premier, on cherche un moyen efficace d'utiliser l'énergie produite localement. L'équilibrage entre la consommation et la production est écrit sous la forme :

$$\begin{aligned} E(10, k) + E(9, k) = & E(8, k) + E(7, k) + E(6, k) \\ & + E(5, k) + E(4, k) + E(3, k) + E(2, k) + E(1, k) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\forall k \in [1, \dots, K]$$

Dans la deuxième simulation, l'habitat revend l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques au réseau avec le prix favorable de 0,3€/kWh. Dans ce cas, l'équation d'équilibrage de la production et de la consommation avec  $E^{ex}(k)$  est l'énergie vendue au réseau durant la période k :

$$\begin{aligned} E(9, k) = & E(8, k) + E(7, k) + E(6, k) + E(5, k) \\ & + E(4, k) + E(3, k) + E(2, k) + E(1, k) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\forall k \in [1, \dots, K]$$

$$E_{ex}(k) = E(10, k)$$

$$\forall k \in [1, \dots, K]$$

6) *Critères d'optimisation et modes de fonctionnement*: Dans ce cas d'étude, nous tenons compte des critères d'optimisation suivants :

a) *Critère de confort de l'utilisateur* :: Ce critère mesure l'impact de la solution par rapport la satisfaction de l'utilisateur :

$$J_1 = U(1) + U(2) + U(3) + U(4) + U(5) + U(6) + U(7) \quad (17)$$

b) *Critère économique* :: Ce critère reflète le coût du plan d'affectation des ressources énergétiques qui est principalement déterminé par le coût de production de l'énergie :

$$J_2 = \sum_{k=1}^K (C(9, k)E(9, k) - 0.3E_{ex}(k)) \quad (18)$$

c) *Critère écologique* :: L'électricité issue du réseau donne en France une émission  $\tau_{CO_2}(9, k)$  de 66g/kWh de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en période creuse et 383g/kWh dans période pleine :

$$J_3 = \sum_{k=1}^K E(9, k)\tau_{CO_2}(9, k) \quad (19)$$

Parmi les fonctionnalités de Multisol, l'utilisateur peut configurer dynamiquement son système de gestion d'énergie selon plusieurs modes différents en fonction de ses besoins :

- Mode confort : c'est le mode où le critère de confort est favorisé. Ce mode est souvent choisi durant la période d'occupation du bâtiment. Il s'agit de mettre en priorité le confort de l'utilisateur par rapport au critère économique et écologique
- Mode économique : dans ce mode, le critère sur le coût est favorisé. Le système de gestion d'énergie va chercher à décaler la consommation en période creuse et à réduire la consommation de certains services pour atteindre cet objectif.
- Mode écologique : ce mode vise à favoriser la réduction d'émissions du gaz carbonique du bâtiment. L'émission de gaz à effet de serre est calculée en fonction de ce critère. Le critère écologique est préféré dans ce mode tout en maintenant le critère de confort de l'utilisateur à un bon niveau.

## B. Résultats

1) *Stratégie 1 : Consommation locale de l'énergie solaire produite*: Dans ce scénario, on examine le cas où le prix de revente de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques n'est pas favorable. On préfère la consommer localement. Pour la première simulation, le mode confort est choisi. Le problème est décrit grâce à la formulation générale présentée dans [5]. Ce problème est un problème d'optimisation de grande taille qui contient 2212 variables et 2108 contraintes. Le nombre de variables binaires est de 190. La procédure d'optimisation implémentée est le recuit simulé hybride abordé dans [5]. Le temps de calcul est fixé à un maximum de 3 minutes.

Au bout de trois minutes, on obtient une solution approchée ayant un critère d'optimisation de 3% supérieur à la borne inférieure. Le critère de coût de la consommation obtenue est de 4,37€ et le critère d'agrégation du confort de tous les services est de 9,5833e-004. La valeur du critère écologique est de 6,037 g d'émission du CO<sub>2</sub>. L'utilisateur obtient alors un niveau de confort maximal dans ce mode de fonctionnement. Mais le critère de coût n'est pas négligé. Dans cette stratégie, on constate que le système favorise la consommation des charges durant la période creuse en profitant du prix de l'électricité le moins cher. L'énergie électrique est alors accumulée sous forme d'énergie thermique dans l'enveloppe du bâtiment et dans l'air. En conséquence, la consommation des services de chauffage est réduite considérablement en soirée. On observe également que la date de fin des services temporisés non-préemptibles correspond parfaitement à la date de fin souhaitée. Le chauffe-eau est alimenté en partie par l'électricité du réseau et en partie complété par l'énergie électrique provenant des panneaux solaires.

Passons maintenant à l'implémentation du mode économique qui favorise la réduction de la facture électrique en gardant le confort à un bon niveau. Une solution optimale est obtenue par le recuit simulé hybride (voir la figure 3). La valeur du critère de coût est quasiment divisé par deux : 2,167€. Néanmoins, le critère de confort s'est dégradé : il est égal à 0.126. La dégradation du confort se traduit par une diminution de la température dans les environnements thermiques. Cependant, cette dégradation reste acceptable (19,5°C) par rapport à la température consigne qui est de 20°C. On observe également un léger décalage du service de lavage par rapport à sa date de fin souhaitée pour profiter de l'énergie gratuite produite par les panneaux photovoltaïques.

Deux simulations sont présentées, nous voulons montrer que grâce au système de gestion d'énergie, l'utilisateur peut contrôler la consommation de son habitat en fonction de ses besoins. Différent scénarios peuvent être imaginés, l'utilisateur peut imposer la contrainte financière au système et le système est chargé de trouver une solution minimisant le critère de confort . Le critère écologique permet à l'utilisateur d'avoir conscience de ses émissions de gaz carbonique.

2) *Stratégie 2 : revente de l'énergie produite*: On choisit de vendre la totalité de l'énergie au réseau. Les consommations des services dans l'habitat sont assurées par l'énergie vendue par le fournisseur d'énergie. On obtient une solution optimale par la recherche tabou hybride. Le critère économique est de 1,97 € dans le mode de confort. Cela signifie qu'avec la tarification actuelle, la seconde stratégie permet à confort égal, de réduire le critère de coût de 45% par rapport à la stratégie de consommation locale de l'énergie produite. Néanmoins, au niveau du critère écologique, l'émission de CO<sub>2</sub> est de 7,33 g soit une augmentation de +20% par rapport à la stratégie de consommation locale de l'énergie produite. En conséquence, l'utilisateur effectue un plan d'affectation des ressources beaucoup moins écologique.

## III. CONCLUSION

Le projet ANR Multisol nous a permis de montrer l'intérêt industriel des méthodes de gestion de l'énergie dans l'habitat que nous avons développées. En effet, nous avons pu adapter nos solutions à des bâtiments photovoltaïques raccordés au réseau en intégrant la problématique de revente d'énergie solaire sur le réseau et en montrant qu'il était possible d'optimiser la production d'énergie locale. Nous avons eu l'occasion d'appréhender les différentes problématiques liées à l'implémentation d'un système de gestion de l'énergie dans le bâtiment concernant tant l'architecture matérielle que l'architecture logicielle. Le projet s'achèvera, dans une année, par une implémentation réelle dans un véritable appartement.

## Prédiction et la production

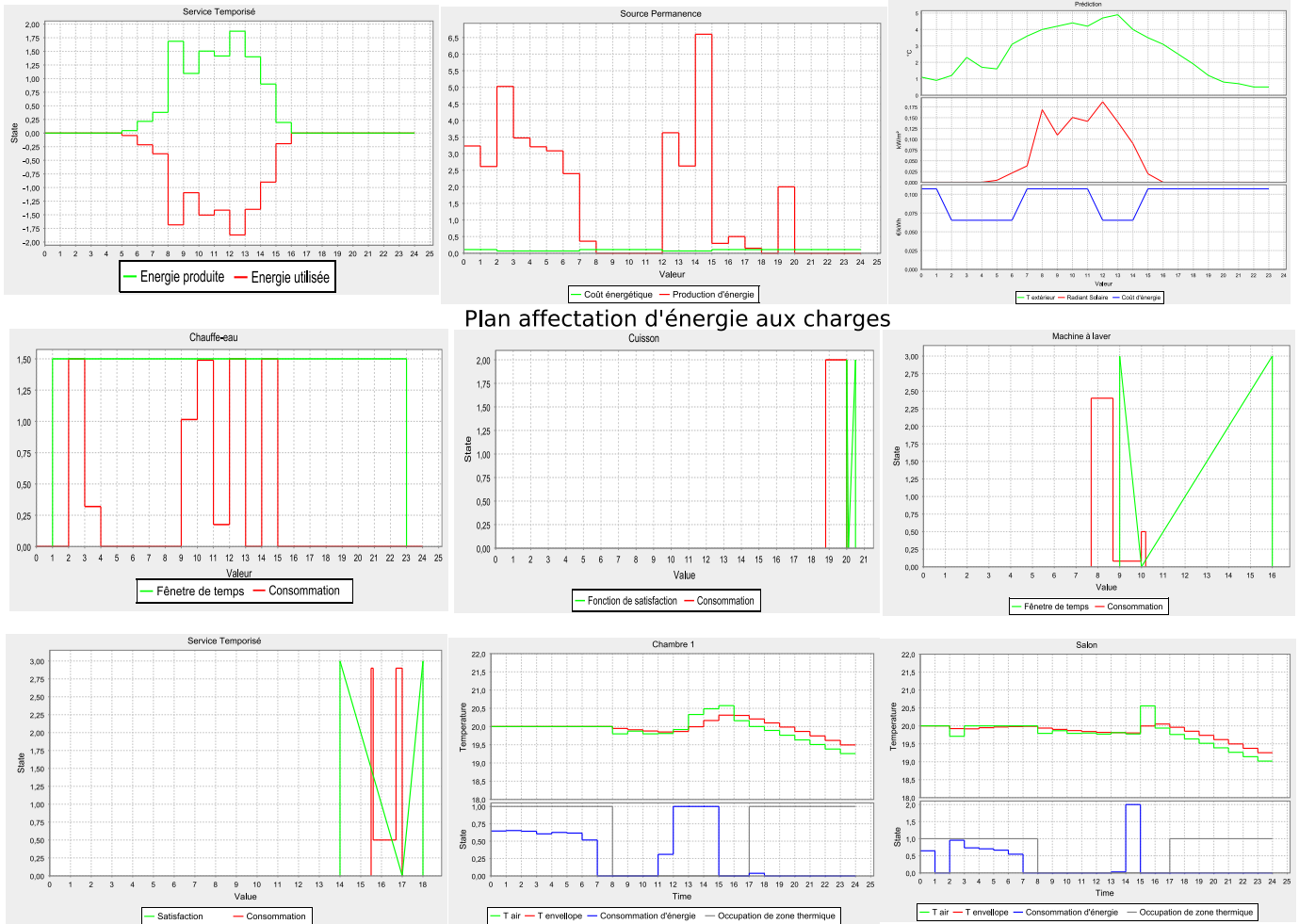


Fig. 3. Résultats d'affectation des ressources d'énergie dans le mode économique avec la stratégie de consommation locale de l'énergie produite

## REFERENCES

- [1] D. Ocnasu, "Modélisation, commande et simulation temps-réel hybride des systèmes de génération non conventionnels," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), September 2008.
- [2] D. L. Ha, S. Ploix, E. Zamai, and M. Jacomino, "A home automation system to improve the household energy control," in *INCOM2006 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2006.
- [3] —, "Tabu search for the optimization of household energy consumption," in *The 2006 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration IEEE IRI 2006 : Heuristic Systems Engineering September 16-18, 2006*, Waikoloa, Hawaii, USA, September 16-18, 2006.
- [4] H. Madsen, "Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building," *Energy and Building*, 1995.
- [5] D. L. Ha, "Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation," Ph.D. dissertation, Ecole Doctorale EEATS Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal, INPGrenoble, September 2007.
- [6] R. Angioletti and H. Despretz, "Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments-définitions. usages. consommations," *Techniques des ingénieurs*, 2004.
- [7] N. Liu, G. Ritzert, and A. Belloc, "Rapport final : Modélisation des flux énergétiques dans une maison autonome," Ecole Centrale de Lyon, Tech. Rep., 2005.
- [8] O. Sidler, "Maîtrise de la demande électrique campagne de mesures par usage dans le secteur domestique," Commission des Communautés Européennes Programme SAVE Contrat N 4.1031/93.58 Rapport final, Tech. Rep., 2002.
- [9] —, "Connaissance et maîtrise des consommations des usages de l'électricité dans le secteur résidentiel," Tech. Rep., 2002.