



HAL
open science

Programmation linéaire pour la gestion de l'énergie électrique d'un habitat

Benjamin Paris, Eric Blanco, Ion Hazyuk

► **To cite this version:**

Benjamin Paris, Eric Blanco, Ion Hazyuk. Programmation linéaire pour la gestion de l'énergie électrique d'un habitat. IBPSA, Nov 2010, Moret-sur-Loing, France. pp.C14. hal-00618625

HAL Id: hal-00618625

<https://hal.science/hal-00618625>

Submitted on 2 Sep 2011

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.

Programmation linéaire pour la gestion de l'énergie électrique d'un habitat

Benjamin Paris¹, Eric Blanco¹, Ion Hazyuk²

¹Laboratoire AMPERE, UMR CNRS 5005

Ecole Centrale de Lyon : 36, Av Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex

benjamin.paris@ec-lyon.fr eric.blanco@ec-lyon.fr

²Laboratoire CETHIL, UMR CNRS 5008

Domaine Scientifique de la DOUA, 9 rue de la Physique, 69621 Villeurbanne CEDEX

RESUME. Le projet MIGRER¹ a pour objectif principal d'améliorer la gestion énergétique d'un habitat multi sources et multi usages. Les contextes actuels économiques et énergétiques, nous amène à concevoir de nouvelles approches, afin d'optimiser la gestion d'un parc électrique multi sources. Il s'agit de développer un outil d'aide à la décision, capable de proposer la meilleure solution d'un point de vue économique, sans altérer le confort des occupants, c'est-à-dire en répondant entièrement au besoin à un moment donné. Pour cela, la Programmation Linéaire, appliquée grâce à l'algorithme du simplexe, permet de déterminer la solution optimale d'une fonction objectif en tenant compte d'un certain nombre de contraintes, comme le prix d'achat au réseau ou encore l'intermittence de la production des ressources à énergies renouvelables (EnR). Notre champ d'application s'illustre par une installation comportant des modules photovoltaïques, une éolienne, un parc batterie et une connexion réseau. L'outil développé est de surcroît testé en émulation.

MOTS-CLÉS : Programmation linéaire, gestion énergétique multi sources.

ABSTRACT. The R&D project called "MIGRER" was created to enhance the energy management of a multisource dwelling. The economic and energetic contexts lead new investigations in order to optimize the building electric consumption. Hence, one need is to design a tool able to determinate the most appropriate choice in an economic point of view, taking into account many constrains dues to energy facilities and various prices of the economic sector. This tool is based on linear programming applied by the simplex algorithm. Our study case, developed with MatLab simulations, is characterized by a wind generator, photovoltaic panels, a battery and an electric network connection. In addition, the tool is tested in a virtual laboratory of the "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment".

KEYWORDS: Linear Programming, multisource energetic management.

1. INTRODUCTION

Un des enjeux majeurs concernant le secteur du bâtiment se caractérise par une nécessaire amélioration de la gestion énergétique. Cette dernière s'avère de plus en plus complexe en raison du nombre croissant d'usages et de nouvelles technologies. Forts de ce constat, les partenaires ENSIAME (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur en Informatique Automatique Mécanique Énergétique Electronique), POWEO, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), CETHIL (Centre Thermique de Lyon), EDF R&D et Laboratoire AMPERE ont mis sur pied le projet MIGRER¹, financé par l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie). L'objectif principal de ce projet est de

¹ Maison Intelligente pour la Gestion Rationnelle des Energies Renouvelables

développer des solutions afin de gérer au mieux un habitat multi sources et multi usages, que ce soit du point de vue thermique ou électrique. La tâche du Laboratoire Ampère, qui se consacre à l'aspect électrique, est de proposer une stratégie claire et précise afin de répondre entièrement à la demande tout en minimisant un critère de coût économique. On parle dans ce cas d'une optimisation de la gestion des ressources et non pas de réduction des consommations. Cette dernière étant notamment liée à une meilleure conception des équipements et à un comportement responsable des usagers.

Concernant un habitat multi sources, nous avons in situ des installations à énergie renouvelable (EnR) qui cohabitent avec le réseau électrique. A tout instant, le réseau du bâtiment voit une charge, une sollicitation à laquelle ces équipements se doivent de répondre. Cela peut se faire de différentes manières en tenant nécessairement compte d'un certains nombres de contraintes. Celles-ci émanent de la disponibilité de l'énergie pour les sources EnR ou encore à l'équilibre entre les coûts de vente et d'achat de l'énergie du réseau. Notons que si les exploitants du réseau de distribution mettent en place une modulation de la tarification (Energie Plus, 2010), la revente totale de l'énergie produite in situ ne sera pas obligatoirement la « meilleure » solution d'un point de vue économique. Il est ainsi impératif de développer un outil permettant de gérer la contribution de chacune des sources au besoin du bâtiment, en s'appuyant sur un critère de coût économique. Cette situation est assimilable à un problème d'allocation de ressources pour lequel la programmation linéaire est particulièrement adaptée.

Des techniques de gestion similaires (Ha Pham *et al.*, 2008) ont été employées pour intervenir, non pas sur les ressources comme nous le proposons, mais sur la charge en réalisant notamment des décalages de services afin d'attendre une plage horaire plus favorable (Le, 2008). Ces techniques font appel à de nouvelles sciences comme l'intelligence artificielle (Courtecuisse *et al.*, 2008) ou, comme dans (Lagorse *et al.*, 2010 ; Ha, 2007), permettent la mise en place de systèmes multi-agents notamment dans l'optique de faciliter la communication entre les matériels. Cependant, tous les équipements ne se prêtent pas au décalage (four, TV...) et il est, de ce fait, peu raisonnable d'envisager ces décalages sur d'autres équipements que ceux de lavage d'un foyer. Il faut garder à l'esprit que le cœur du problème reste les occupants et leur confort. L'usage lorsque bon leurs semble de leurs équipements courants fait partie du confort de vie. Ne pas respecter ce point risque de conduire à la sensation d'une perte de la maîtrise de leur environnement et sera contraire à l'acceptabilité des solutions.

Notre travail s'organise de la façon suivante : dans un premier temps une présentation succincte de la programmation linéaire est réalisée en complément de son application à notre cas d'étude, puis dans un second, les points essentiels (application, résultats) ayant attiré aux tests en émulation sont exposés.

2. PRESENTATION DE L'OUTIL

2.1. PRINCIPES DE LA PROGRAMMATION LINEAIRE

La programmation linéaire (Teghem, 1996), développée en 1947 par G. Dantzig et M. Wood et utilisée en particulier dans la planification économique, permet de trouver la solution

optimale de certains problèmes. Les problèmes de programmation linéaire s'écrivent sous la forme suivante (Equation 1) :

Soient $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ et $c = (c_1, \dots, c_n)^T \in \mathbb{R}^n$ connus, avec $m \leq n$.

On cherche le vecteur $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ tel que

$$\begin{cases} \min_x f(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad [1]$$

avec f représentant la *fonction objectif*, $Ax = b$ et $x \geq 0$ les *contraintes*. Lorsque ces dernières sont des égalités, on parle alors de programme linéaire sous *forme standard*. L'ensemble des $x \in \mathbb{R}^n$ tels que $Ax = b$ est une *variété affine* dont l'intersection avec l'ensemble des $x \geq 0$ forme un ensemble convexe, souvent noté U , appelé *région réalisable*. Chacun des points de la région réalisable caractérise une *solution réalisable* parmi lesquelles au moins une minimise la fonction objectif : il s'agit de la *solution optimale*, située en l'un des sommets de la région réalisable U , obtenue par l'utilisation de l'algorithme du simplexe (Brezinski, 2002 ; Dantzig, 1990). La modélisation d'un problème linéaire se déroule en trois étapes : (i) identification des variables, (ii) formulation des contraintes et (iii) définition de la fonction objectif. Puis l'écriture sous forme standard est recherchée avant d'appliquer l'algorithme du simplexe (qui ne sera pas détaillé ici).

2.2. MISE EN FORME DU PROBLEME (MODELISATION)

Le problème, tel que nous l'envisageons, invite à ne pas revendre systématiquement la totalité de la production, mais en fonction des coûts d'achat et de vente, de l'énergie produite et de la charge, de l'utiliser in situ, de revendre le surplus ou encore de stocker cette énergie. La configuration retenue pour la mise en situation, est illustrée par un habitat équipé d'une éolienne, de modules photovoltaïques, de batteries de stockage et d'une connexion réseau. De ce fait, les variables du problème linéaire sont les suivantes :

- puissances disponibles à l'instant t : P_e (éolienne), P_s (modules photovoltaïques), P_r (réseau), P_{st} (éléments de stockage),
- puissance à fournir à l'instant t : P_t (puissance totale appelée par les charges),
- les tarifications à l'instant t : C_r le prix d'achat au réseau, C_e le prix de vente de l'énergie éolienne et C_s le prix de vente de l'énergie photovoltaïque.

Il nous faut de surcroît, afin de pouvoir prendre une décision sur l'allocation des ressources, connaître l'état du stock. Naturellement ces variables sont positives ou nulles. En outre, l'ensemble des sources doit fournir la totalité de la puissance appelée par la charge. En conséquent, la première contrainte est donnée par (Equation 2) :

$$P_e + P_s + P_r = P_t + \alpha P_{st} \quad [2]$$

avec $\alpha = \{-1, 0, 1\}$.

Le paramètre α permet de stipuler si l'élément de stockage est actif ou non, s'il est en phase de stockage ou de déstockage. L'installation concernée dispose de 15 m² de modules photovoltaïques (PV) ayant une puissance crête de 100 W.m⁻², d'une éolienne de 3 kW.

L'abonnement au réseau est pris sur les standards, à savoir un abonnement de 30 A. On obtient alors les contraintes suivantes (Equation 3) :

$$0 \leq P_e \leq 1500, 0 \leq P_s \leq 3000, 0 \leq P_r \leq 6000 \quad [3]$$

Ce qui nous intéresse véritablement est le montant total du coût de fourniture de l'énergie au bâtiment. La fonction objectif doit être construite pour traduire ce besoin. On va pour cela introduire des pondérations représentatives des coûts associés à chacune des sources. Que l'on revende la totalité de la production au réseau ou qu'elle soit utilisée en interne, les coûts de production associés à l'amortissement de l'installation et à sa maintenance sont toujours présents. Ils sont donc exclus de la fonction objectif car ils n'interviennent pas dans la décision entre les différentes situations de fonctionnement. Ils restent néanmoins présents dans notre problème car ils impactent sur la marge bénéficiaire. On tiendra compte du prix d'achat à l'exploitant C_r et des prix de vente à ce même exploitant C_s et C_e . On doit retenir parmi les deux propositions suivantes la plus intéressante d'un point de vue économique :

- Proposition 1 : la totalité de l'énergie nécessaire est achetée au réseau et la totalité de la production est revendue (Equation 4) ;

$$\text{Coût} = C_r P_t - C_e P_e - C_s P_s \quad [4]$$

- Proposition 2 : on utilise en interne la production en achetant uniquement le complément (Equation 5) ;

$$\text{Coût} = C_r P_r \quad [5]$$

Au regard de ces deux propositions, des règles expertes de la forme « si...alors » auraient pu être utilisées. Cependant, contrairement à la programmation linéaire, elles transforment chaque cas d'étude en un cas particulier avec une prise en compte de plus en plus difficile d'un optimum au regard de l'ensemble des contraintes (contraintes croissantes avec le nombre de sources). Cela impliquerait également de balayer l'intégralité de l'espace des solutions pour pouvoir déterminer la plus favorable. L'avantage de la programmation linéaire est de ne parcourir que les frontières de l'espace délimité par l'ensemble des contraintes, sachant que les points d'intersection des droites associées aux différentes contraintes et restreignant l'espace des solutions forment des sommets dont un correspond à la solution optimale du problème. Le choix du parcours le long des segments reliant un sommet à ses voisins est donné par l'évaluation de la fonction objectif pour chacune des directions possibles à partir de ce même sommet.

Des propositions 1 et 2, on peut en déduire la fonction objectif suivante (Equation 6) :

$$f(P_e, P_s) = (C_r - C_e)P_e + (C_r - C_s)P_s \quad [6]$$

Ainsi, on peut facilement étendre la fonction à l'ordre n , c'est-à-dire à n sources, ce qui nous conduit à sa forme général (Equation 7) :

$$f = \sum_{i=1}^n ((C_r - C_i)P_i) \quad [7]$$

3. TESTS EN EMULATION

Le principal objectif de ces tests est de réaliser une étude de faisabilité dans l'optique de confronter l'outil développé en simulation à une situation réelle : étude du fonctionnement global de l'installation ; étude du matériel.

3.1. APPLICATION

L'utilisation de la programmation linéaire permet à partir des différentes puissances disponibles (modules PV, éolienne et réseau), de la puissance appelée par la charge ainsi que des différentes tarifications (prix d'achat de l'électricité, prix de revente des énergies renouvelables) de connaître la contribution respective de chacune des sources, afin de minimiser un critère économique. On obtient donc les quantités précises consommées en interne et celles revendues au réseau. Toutefois, pour des raisons techniques lors des tests en émulation, ces quantités doivent être considérées comme des variables discrètes. En conséquence, à partir des résultats de l'optimisation et pour rendre le fonctionnement de l'installation réalisable et cohérent lors des tests, des hypothèses complémentaires ont été émises et appliquées (Figure 1):

- Hypothèse 1 : on cherche à maximiser la consommation des EnR in situ (après la prise de décision économique).
- Hypothèse 2 : on souhaite garder le stock à un certain niveau (privilégier le stockage à la revente après la prise de décision économique).
- Hypothèse 3 : on favorise l'utilisation du stock EnR par rapport au réseau.

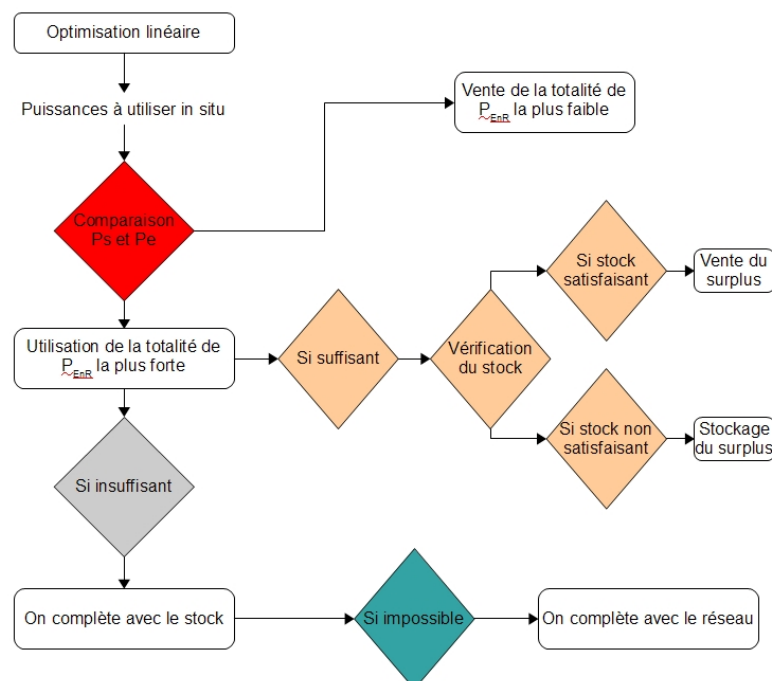


Figure 1 : Algorithme de la prise de décision.

Comme nous connaissons déjà les puissances mises en jeu, il nous faut par conséquent définir les différentes tarifications. Celles utilisées se basent sur le contrat « Bleu-Ciel » de EDF avec l'option Heures Creuses/Heures Pleines (HC = 0,0734, HP = 0,1154 euros.kWh⁻¹).

En ce qui concerne le rachat des productions EnR, l'énergie photovoltaïque est vendue à $0,58 \text{ euros.kWh}^{-1}$ (JO, 2010) et l'énergie éolienne à $0,082 \text{ euros.kWh}^{-1}$ (JO, 2008).

En outre, le schéma représentant l'installation émulée doit être clairement identifié (Figure 2). Nous avons recours ici au laboratoire virtuel Simbad du CSTB qui permet d'émuler le fonctionnement d'un habitat et d'équipements énergétiques, le tout en temps réel. Cette installation est équipée de plusieurs capteurs pour les tests à effectuer. D'une part, des mesures d'énergie électrique : A (énergie PV revendue au réseau), B (énergie éolienne revendue au réseau), C (énergie PV fournie à la charge ou/et à la batterie), D (énergie éolienne fournie à la charge ou/et à la batterie), E (énergie achetée au réseau consommée par la charge), F (énergie consommée par la charge), G (énergie fournie/stockée par la batterie) ; et d'autre part des mesure des puissance : puissance disponible en sortie des modules PV, puissance disponible en sortie de l'éolienne, puissance appelée par la charge en plus du niveau du stock.

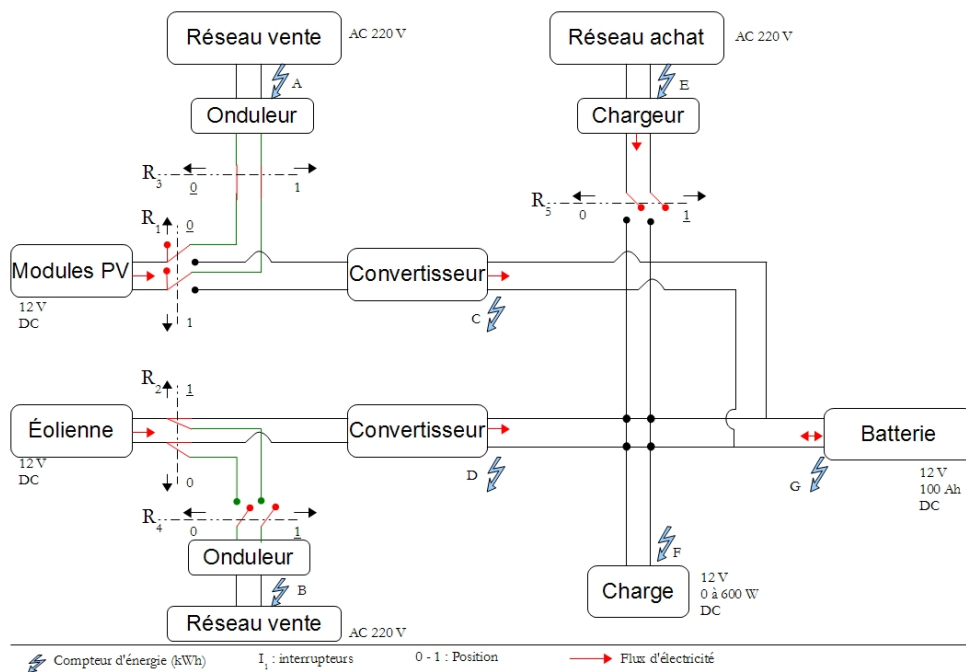


Figure 2 : Schéma de l'installation émulée.

Ensuite, le programme d'optimisation a été implémenté dans une carte d'acquisition-commande DSpace et un bornier a été configuré pour permettre la communication avec l'installation émulée par le CSTB. Au sujet de la commande, il s'agit d'envoyer un ordre à chaque relais pour lui signaler sa position à un instant t en fonction du résultat de la prise de décision (Figure 3).

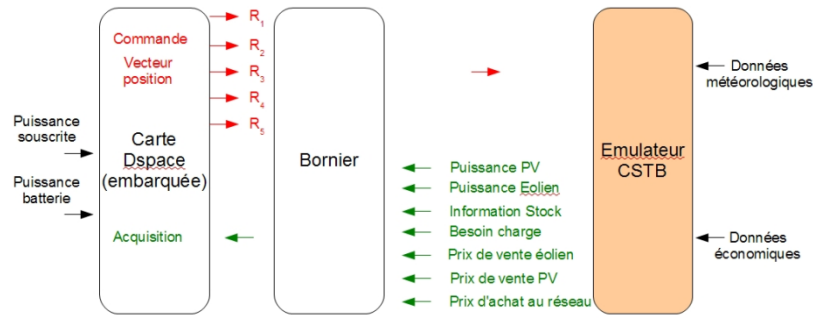


Figure 3 : Schéma de la communication des tests en émulation.

3.2. RESULTATS

Les figures 4 à 6 illustrent les résultats des tests, d'une durée d'une semaine, ayant recours à des données de consommations électriques d'un habitat ainsi que des données météorologiques fournies par EDF R&D et le CSTB.

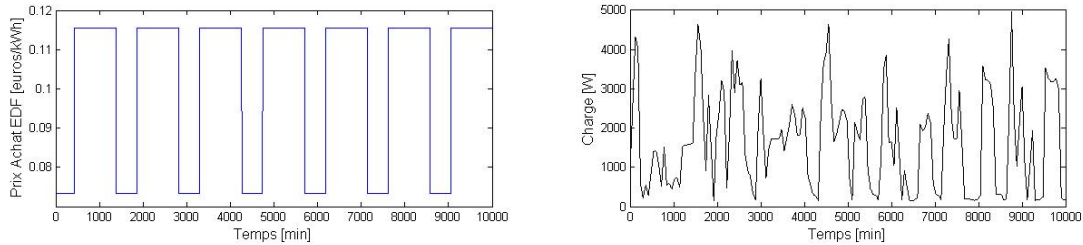


Figure 4 : Variations du prix d'achat au réseau et de la charge.

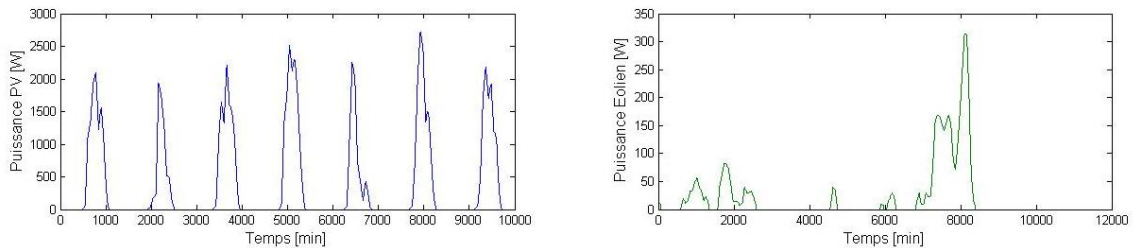


Figure 5 : Variations des productions EnR.

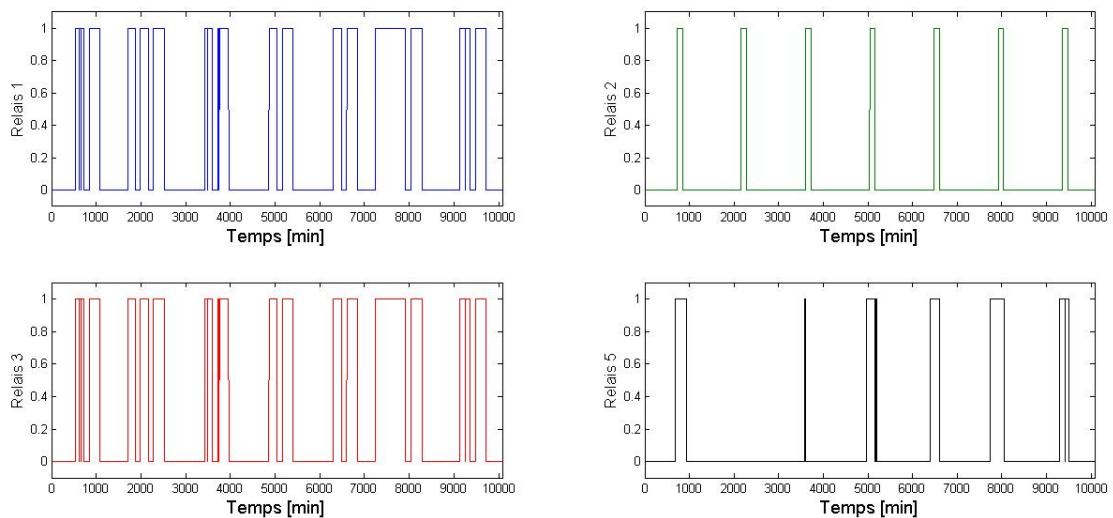


Figure 6 : Commutations successives des relais 1, 2, 3 et 5.

Le Tableau 1 résume quant à lui les résultats économiques. Il s'agit ici de comparer le cas classique (acheter toute l'énergie demandée au réseau et revendre la totalité des productions EnR) avec les résultats de l'optimisation.

Tableau 1. Comparaison économique [euros].

	Coût achat EDF	Bénéfices vente PV	Bénéfices vente Eolien
Cas classique	27	40	0,34
Optimisation	26	40	0,11

De manière générale, on remarque une baisse de 4 % (-1 euro) du coût de fourniture en électricité, ainsi qu'une diminution des bénéfices de la revente de l'énergie éolienne d'environ 70 % (-0.23 euro). L'énergie photovoltaïque est en totalité revendue en raison de son fort prix de rachat. Au final, la programmation linéaire nous apporte une optimisation économique des ressources. Notons toutefois que ces résultats ne correspondent qu'à une seule semaine et que des tests sur une période plus longue permettraient d'affiner ces pourcentages.

4. CONCLUSION

Dans le cadre du projet MIGRER, un outil de gestion de l'énergie électrique a été développé afin d'améliorer le fonctionnement de plusieurs sources d'énergie au sein d'un habitat. Cet outil se base sur la programmation linéaire appliquée via l'algorithme du simplexe. Il permet de déterminer précisément, lors d'une sollicitation de la charge, quelle puissance doit être utilisée pour chacune des sources dans l'optique de minimiser un coût économique. Cette minimisation dépend de contraintes relatives aux installations concernées (éolienne, modules PV, réseau) ainsi qu'à la conjoncture économique (tarification de vente et de rachat). En outre, les tests en émulation ont permis de valider une partie du matériel nécessaire à la mise en situation réelle. Il s'agit de la carte d'acquisition-commande conçue sous l'environnement DSpace. Il en résulte des perspectives logiques, à savoir la réalisation d'un banc de test réel au sein du Laboratoire Ampère, en ayant recours par exemple à des charges programmables ou encore à des modules PV déjà sur site. Les partenaires de ce projet ont également le souhait de donner suite à ces travaux en y étudiant plus précisément la composante stockage ainsi que les modulations tarifaires d'achat et de vente de l'énergie électrique à plus long terme. En effet, il serait intéressant d'évaluer la capacité d'un tel outil à anticiper les différentes variations de puissances et de tarif, et d'étudier différentes situations, comme par exemple stocker l'énergie du réseau lors d'une tarification favorable et de la consommer afin de s'effacer sur demande de l'opérateur. Pour cela, il est nécessaire d'introduire de nouveaux éléments permettant notamment de réaliser une prédiction des consommations sur un horizon de temps dépendant de la capacité de stockage, de la durée souhaitée d'effacement et des besoins du foyer dans cette même plage de temps. Une représentation par un processus stochastique de l'évolution dynamique des consommations est en cours.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Brezinski C. (2002) « *Initiation à la programmation linéaire et à l'algorithme du simplexe* », Editions Ellipses, Collection Mathématiques Appliquées.
- Courtecuisse V., Sprooten J., Robyns B., Petit M, Francois B., Deuse J. (2008) « A methodology to design a fuzzy logic based supervision of hybrid renewable energy systems », *Mathematics and Computers in Simulation*, doi:10.1016/j.matcom.2010.03.003.
- Dantzig G.B. (1990) « *Origins of the simplex method* », A history of scientific computing, S.G. Nash ed., ACM Press, New York, p. 141-151.
- Energie Plus (2010) « *Pointe de consommation d'électricité : les préconisations du rapport Poignant-Sido* », n°443 du 1er avril 2010.
- Ha D.L. (2007) « *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 180 p.
- Ha Pham T.T., Clastres C., Wurtz F., Bacha S., Ploix S. (2008) « Mise en œuvre de l'optimisation pour le dimensionnement et les études de faisabilité de systèmes multi-sources électriques dans le bâtiment », International Building Performance Simulation Association, France, 12 p.
- Journal Officiel (2010). « Arrêté du 12 janvier 2010 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil telles que visées au 3° de l'article 2 du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000 ».
- Journal Officiel (2008). « Arrêté du 17 novembre 2008 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent ».
- Lagorse J., Paire D., Miraoui A. (2010) « A multi-agent system for energy management of distributed power sources », *Renewable Energy* 35, p. 174–182.
- Le K. (2008) « *Gestion optimale des consommations d'énergie dans le bâtiment* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 195 p.
- Teghem J. (1996) « *Programmation Linéaire* », Editions Ellipses, Collection Statistique et Mathématique Appliquées.