HAL
open science

Optimisation sur cycle de vie de systèmes photovoltaïques autonomes. Influence des profils de consommation

Julien Seigneurbieux, Yaël Thiaux, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed

To cite this version:

Julien Seigneurbieux, Yaël Thiaux, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed. Optimisation sur cycle de vie de systèmes photovoltaïques autonomes. Influence des profils de consommation. Electrotechnique du Futur 2005, Sep 2007, TOULOUSE, France. 8p. hal-00676129

HAL Id: hal-00676129

https://hal.science/hal-00676129v1

Submitted on 3 Mar 2012

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.

Conférence EF 2007
ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007

OPTIMISATION SUR CYCLE DE VIE DE SYSTÈMES PHOTOVOLTAIQUES AUTONOMES. INFLUENCE DES PROFILS DE CONSOMMATION.

SEIGNEURBIEUX Julien, THIAUX Yaël, MULTON Bernard, BEN AHMED Hamid
SATIE, ENS Cachan Bretagne, CNRS, UEB
Av. Robert Schuman, 35170 BRUZ, France
julien.seigneurbieux@bretagne.ens-cachan.fr *http://www.satie.ens-cachan.fr*

Résumé

Cet article expose les résultats d'une méthode originale d'optimisation du dimensionnement, prenant en compte le fort couplage entre la capacité de stockage, la ressource énergétique intermittente (ici photovoltaïque) et la consommation fluctuante. Nous utilisons une méthode d'optimisation multiobjectifs (taux de modification du profil et coût énergétique total sur cycle de vie ou GER) pour s'orienter vers un meilleur choix des paramètres de dimensionnement et de gestion du système.
Les simulations du système complet sont réalisées à partir de modèles technicoéconomiques et de profils de production et consommation horaires sur plusieurs années. L'optimisation croisée des variables de dimensionnement et de gestion de l'énergie permet de définir des stratégies spécifiques à chaque individu. Nous nous intéressons plus particulièrement ici à l'influence du profil de consommation sur l'algorithme d'optimisation et à l'influence de sa modification notamment, en recherchant des profils de consommation optimaux.

This paper describes a specific design optimisation for standalone photovoltaic (PV) systems. The strong correlation between hardware design (PV, batteries and converter) and energy management are taken into account. The models featured herein (electrical, energy, and system aging) are simulated over a 15-year life cycle. The objectives (optimization criteria) considered in this approach are not limited to the classical notion of financial costs but instead encompass environmental energy costs (Global Energy Requirement, or GER), in addition to the rate of consumer satisfaction (load shedding and load modulation have been envisaged). The research of optimum consumption profiles was led in order to use it as an energy management parameter.

Mots Clés. Optimisation multiobjectifs, Systèmes photovoltaïques autonomes, Analyse sur cycle de vie, Profils de consommation, Eco-conception.

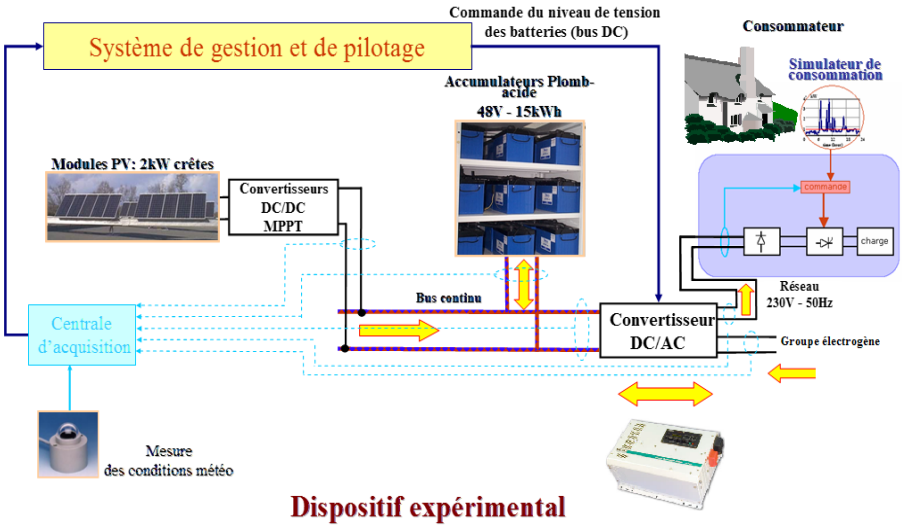

Figure 1: Dispositif expérimental ayant servi à valider les modèles pour la simulation sur cycle de vie
Le simulateur de consommation pourra valider les travaux sur la modification du profil.

Du fait de l'importance de l'investissement initial, le dimensionnement d'une installation autonome de production d'électricité photovoltaïque doit être particulièrement rigoureux et soigné. Dans un souci d'exhaustivité, c'est bien sûr l'ensemble des composants de la centrale de production qui doit être considéré.

Cet article propose une voie originale d'amélioration de l'optimisation du dimensionnement des installations autonomes de production d'électricité photovoltaïque. Les objectifs du dimensionnement ont été choisis afin de fournir au décideur non pas une solution optimale unique, mais un ensemble de configurations de compromis, chacune dominant les autres selon au moins l'un des critères. Afin de permettre une convergence efficace vers des solutions de compromis, il est nécessaire que les objectifs à minimiser soient contradictoires. Ces solutions sont présentées sous la forme d'un front de Pareto.

En utilisant un outil d'analyse technico-économique développé et validé précédemment , nous pouvons, à partir de données supposées déterministes, simuler le fonctionnement électrique et énergétique de chaque composant de l'installation et en déduire le coût global du système ainsi que sa capacité à répondre aux besoins du consommateur.

Les modèles et l'outil d'analyse développés exploitent des profils d'ensoleillement et de consommation échantillonnés heure par heure sur une durée de 15 ans (d'autres périodes d'étude sont bien sûr possibles). Ils permettent ainsi une analyse à la fois rapide et précise d'un système de production complet : depuis les panneaux photovoltaïques jusqu'à l'onduleur, en passant par le système de stockage.

La simulation « pas-à-pas » permet de calculer les flux d'énergie au fur et à mesure de l'évolution des profils de production / consommation. Elle affine ainsi le dimensionnement habituellement utilisé qui utilise une consommation quotidienne constante et des productions renouvelables fortement moyennées. L'état de charge de la batterie, qui détermine notamment le rendement en charge ou en décharge, est calculé pour chaque instant.

I.MODELISATION ET SIMULATION

L'installation considérée comprend des panneaux photovoltaïques, un stockage électrochimique (batteries au Plomb étanches) et un convertisseur réversible AC/DC.

Tous les modèles des composants de l'installation ont été validés expérimentalement dans [GER_03] grâce à une plate-forme instrumentée. Cette plate-forme est schématisée Figure 1. Pour le dimensionnement des composants effectué à partir des modèles validés sur cette plate-forme (puissances et capacités différentes), on applique des fonctions d'échelle très simples en considérant que les technologies sont conservées.

A.Modélisation des composants du système

La ressource solaire étant traitée de façon déterministe, la puissance productible du générateur photovoltaïque (normalisée par rapport à la puissance crête) n'est calculée qu'une fois pour toutes pour un site donné. Ce calcul est effectué selon le modèle polynomial décrit dans [GER_03]. La production électrique potentielle des panneaux (avec MPPT) pour un système donné est alors simplement le produit de ce profil de production par la puissance crête des panneaux.

La modélisation des batteries comme de l'onduleur nécessite par contre un calcul en chaque instant du profil de consommation. La modélisation du système de stockage, particulièrement délicate, utilise le modèle coulombien du CIEMAT [COP_93]. Il est difficile de s'affranchir de l'approche coulombienne (électrique) qui permet de calculer l'état de charge de la batterie à chaque instant, mais le modèle du CIEMAT est un bon compromis entre vitesse de résolution et finesse du modèle. Il nécessite cependant un calcul itératif fastidieux à chaque pas de temps permettant de déterminer le courant et la tension aux bornes de la batterie.

L'allure du rendement de la batterie pour différentes puissances de charge et de décharge est donnée Figure 2. On y voit qu'en charge, le rendement est d'autant plus faible que l'état de charge est proche de 100% et que la puissance de recharge est importante. En décharge au contraire, le rendement est bon aux grands états de charge mais s'écroule aux faibles états de charge. D'ailleurs il existe pour chaque état de charge une puissance maximale de décharge admissible, au-delà de laquelle la résistance interne de la batterie devient trop importante.

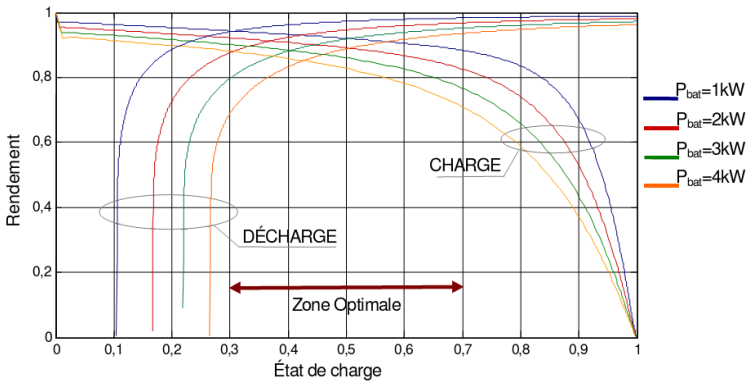

Figure 2:Evolution du rendement global des batteries en charge et en décharge
24 éléments Pb-Ac VRLA – C_{10} = 325 Ah ou W_{bat} = 15,6 kWh (10 heures)

Quant au rendement du convertisseur AC/DC réversible, on utilise la fonction de référence présentée Figure 3. Dans le cas considéré dans cet article, il n'est employé qu'en mode onduleur mais les résultats sont symétriques en cas d'emploi en redresseur. On peut remarquer que l'utilisation de l'onduleur pour les faibles consommations est très péjorative. Il est donc important de dimensionner l'onduleur au plus près des besoins du consommateur, et seule l'optimisation sur cycle de fonctionnement peut permettre de déterminer s'il vaut mieux installer un onduleur légèrement surdimensionné (meilleur rendement aux puissances moyennes) ou juste suffisant afin d'optimiser les pertes pour les faibles consommations.

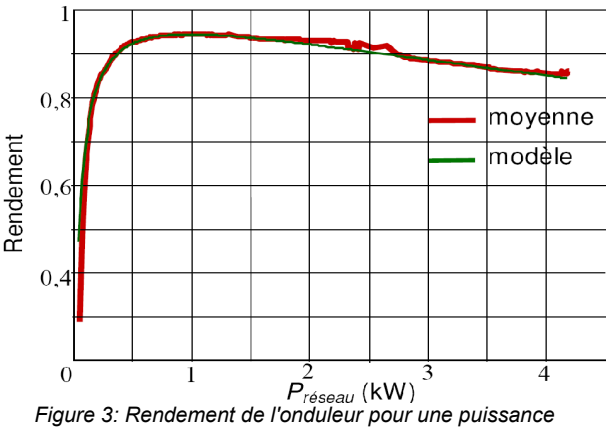

Figure 3: Rendement de l'onduleur pour une puissance nominale de 4,5 kVA

Par ailleurs il est intéressant de noter que la part constante de la consommation d'un onduleur de 4500 VA en fonctionnement se chiffre à 43 W. Ceci fixe le minimum de consommation en amont de l'onduleur (côté DC).

Le vieillissement des batteries, pris également en compte dans les simulations, est un facteur déterminant dans le coût, aussi bien financier qu'environnemental, du système. Le vieillissement en cyclage des accumulateurs, notamment s'ils sont mal gérés, peut devenir le principal poste de coût de l'installation. Les données constructeurs nous ont permis de modéliser le vieillissement des accumulateurs en associant leur durée de vie à une quantité totale d'énergie échangée constante (1350 kWh par kWh de capacité) :

$$Nb\,de\,cycles * Profondeur\,de\,Décharge = Cste$$

Bien que cette modélisation de la durée de vie en cyclage soit très simplifiée, elle permet cependant une approximation raisonnable de ce facteur.

B.Simulation sur cycle de fonctionnement

Les modèles électriques, énergétiques et de vieillissement du système entier, notamment des batteries, sont simulés sur un cycle de 15 ans (131'496 heures). La simulation déterministe impose donc de disposer de données de gisement solaire et de consommation sur toute la durée de la simulation. Les données de consommation sont basées sur la consommation réelle d'un foyer français hors eau chaude sanitaire et chauffage (données ENERTECH). Le gisement solaire est quant à lui un relevé Météo-France du rayonnement solaire proche du site du laboratoire, à Rennes. La Figure 4 montre l'allure des profils horaires considérés.

Les temps de calcul ont été améliorés de façon à limiter à quelques secondes la simulation complète du système. Le système est optimisé en supposant que l'on connaît parfaitement les ressources et le profil de consommation.

Nous avons défini le consommateur « réel » à partir de profils de consommation horaires mesurés in situ chez un consommateur. C'est ce consommateur qui nous sert de référence. Même si l'allure du profil de consommation est modifiée (Figure 7), la consommation totale énergétique est supposée constante afin d'avoir un critère de comparaison efficace (82 MWh électriques sur 15 ans).

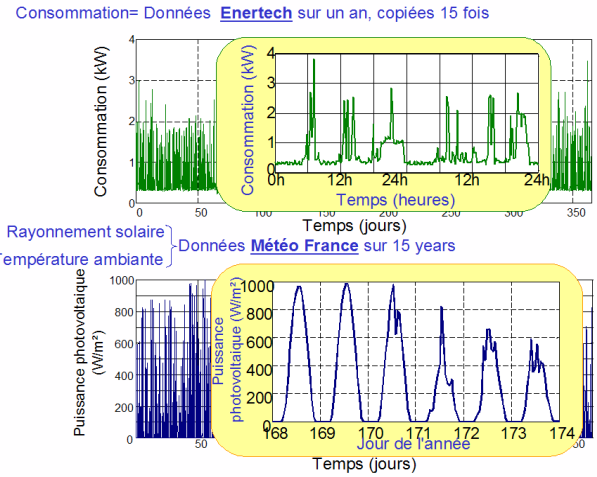

Figure 4: Profils de production et de consommation déterministes sur 15 ans

C.Analyse sur cycle de vie

La minimisation des coûts financiers est habituellement le principal objectif d'une méthode de dimensionnement des installations photovoltaïques. Néanmoins, dans un contexte dominé à la fois par les préoccupations environnementales et soumis à de fortes disparités concernant le financement et le subventionnement des installations, les coûts environnementaux sont parfois mieux indiqués pour comparer des installations suivant des critères intrinsèques aux technologies employées.

Nous avons utilisé des données issues d'analyses sur cycle de vie pour déterminer, à titre indicatif, les valeurs de l'énergie primaire équivalente nécessaire à l'installation sur tout son cycle de vie, « du berceau à la tombe ». Les données sont extraites des travaux de [RYD_04]. Ces données de coût peuvent être affinées et ne sont utilisées ici que pour valider la méthodologie d'optimisation.

Coût énergétique global (*GER*) sur cycle de vie, exprimé en Energie primaire fossile équivalente	
Panneaux photovoltaïques (1 kWc)	12,5 kWh
Batteries étanches Plomb-Acide (1 kWh)	422 kWh
Convertisseur AC/DC réversible (1 kVA)	833 kWh

Tableau 1: Données de GER (Global Energy Requirement) en énergie primaire fossile équivalente [RYD_04]

Le coût énergétique global est exprimé en kWh thermiques d'énergie fossile équivalente. Cette grandeur représente l'énergie thermique qui pourrait être dissipée par l'équivalent de la quantité de carburants fossiles utilisés sur le cycle de vie des différents constituants du système. Il faut noter que la technologie de modules photovoltaïques employée peut avoir une grande influence sur ce coût [ALS_99] et il en est de même pour celle de stockage. En effet nous verrons plus loin (Tableau 2) que la part dans le coût global d'une installation autonome des panneaux photovoltaïques est très importante, voire majoritaire.

II.OPTIMISATION

La démarche d'optimisation [SEI_06], illustrée par la Figure 5, consiste à rechercher sur un cycle de vie (ici une durée arbitraire de 15 ans) les paramètres d'optimisation (puissance crête du générateur photovoltaïque, capacité de stockage, puissance nominale de l'onduleur et modes de gestion) permettant de minimiser deux objectifs (ou plus) contradictoires. Les objectifs optimisés dans cet article sont :

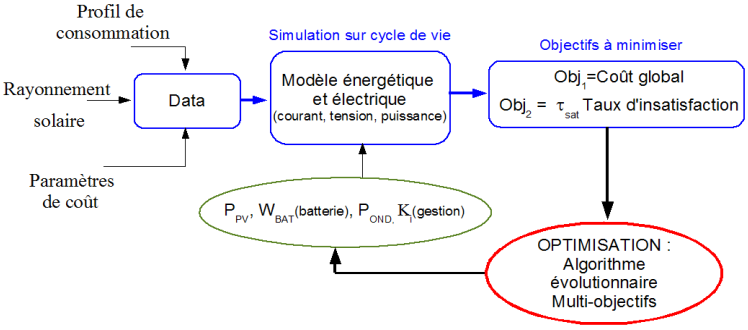

Figure 5: Synoptique de la méthodologie utilisée

1- le coût énergétique global sur cycle de vie, exprimé en kWh thermiques d'énergie primaire équivalente (sur la base des process actuels et production d'électricité et de fabrication),
2- Le taux de modification du profil ou taux d'insatisfaction du consommateur, caractérisant la partie de la demande du consommateur d'électricité qui n'a pas pu être fournie à l'instant où il l'a demandée et qui a été différée.

Les résultats mettent ainsi en évidence les meilleures configurations de compromis entre le coût (environnemental ou financier) de l'installation et le délestage du consommateur. L'algorithme d'optimisation utilisé est de type génétique NSGA II [DEB_01]. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de fronts de Pareto (Figure 6).

III.INFLUENCE DU PROFIL DE CONSOMMATION

La consommation électrique demandée étant de 82 MWh sur 15 ans, cela revient à une énergie fossile équivalente d'environ 200 MWh thermiques.

L'optimisation multiobjectifs minimise (en ordonnée) le coût énergétique global de l'installation sur cycle de vie (investissement, fonctionnement et fin de vie) appelé GER et en abscisse une indication de la modification du profil de consommation (délestage pur ou déformation du profil de consommation à énergie consommée constante).

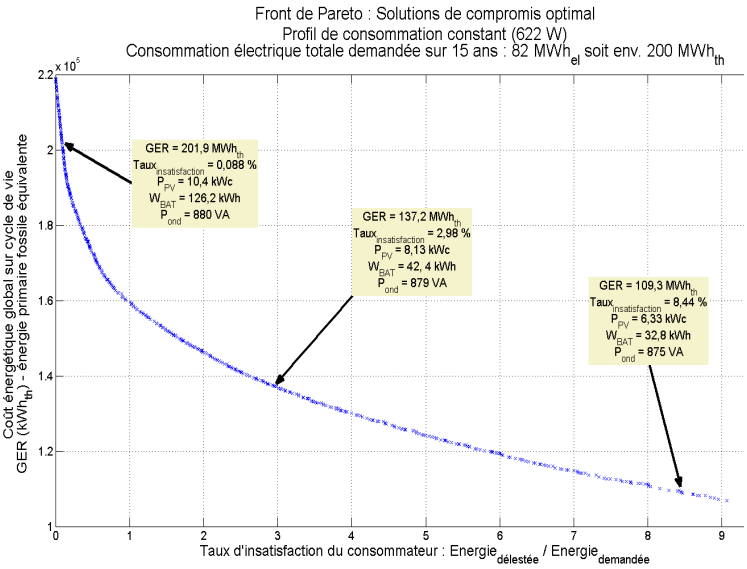

Figure 6: Résultat d'optimisation avec délestage du consommateur autorisé.

A.Délestage du consommateur

Dans un premier temps, la seule modification du profil de consommation autorisée consiste en un simple délestage du consommateur : l'algorithme d'optimisation va ainsi rechercher les solution les moins coûteuses permettant de satisfaire le consommateur au moins 90 % du temps. Nous sommes bien conscients que cette approche est très théorique et qu'elle ne prend pas en compte les contraintes sociologiques mais elle nous semble

nécessaire pour aborder ce problème extrêmement complexe. Les solutions à ce problème, distribuées sur un front de Pareto (Figure 6), montrent l'influence que peut avoir, sur le coût global de l'installation, la tolérance du consommateur à un délestage même très faible. Le coût énergétique de l'installation sur cycle de vie peut ainsi être diminué de 30 % en acceptant un délestage de moins de 1% de l'énergie totale demandée. Si l'on observe les résultats dans les détails, il apparaît rapidement que les délestages sont localisés aux instants où le déficit de production par rapport à la puissance demandée est le plus faible alors que l'état de charge des batteries est très bas. (grande consommation un matin d'hiver par exemple).

Ce sont donc en quelque sorte les pics du déficit de production par rapport à la consommation qui, aux instants où l'état de charge des batteries est au plus bas, pénalisent le dimensionnement de l'installation (surdimensionnement pour peu de service rendu).

B.Influence du profil de consommation

La sensibilité des résultats d'optimisation au profil de consommation de référence est très importante. En effet, en optimisant l'installation pour 3 profils de consommation caricaturaux et complètement théoriques, chacun consommant la même quantité d'énergie électrique (82 MWh sur 15 ans), le coût global sur cycle de vie peut être largement amélioré. Ces trois profils (Figure 7) sont :

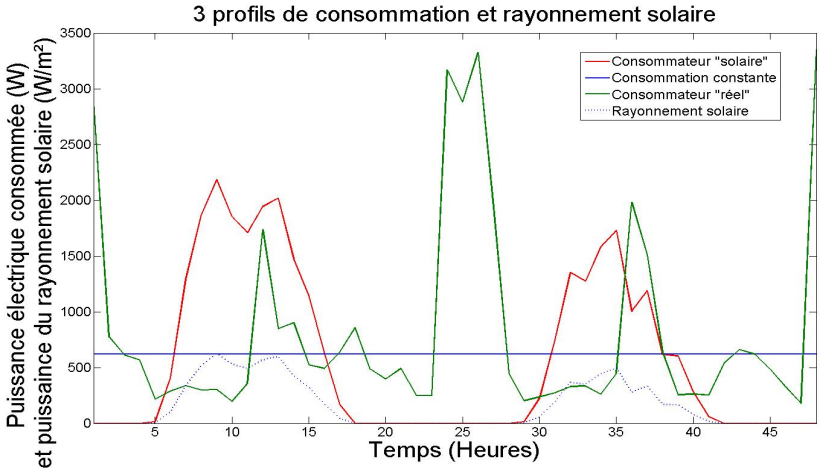

Figure 7: 3 profils caractéristiques testés pour l'optimisation.

1- Une consommation constante de 622 W.
2- Un profil « réel » fondé sur des mesures effectuées chez un consommateur.
3- Un profil « solaire » homothétique au profil de production, censé représenter le cas idéal minimisant le coût global en annulant le recours au stockage (tout ce qui est produit est immédiatement consommé).

Les résultats (Figure 8) montrent bien que l'allure du profil influe très fortement sur le coût global (presque jusqu'à un rapport 4). Il apparaît donc particulièrement intéressant d'envisager une optimisation de la consommation au cours du temps.

Le profil « solaire » semble bien (Figure 8) être le profil optimal vers lequel il faudrait faire converger un profil de consommation modifié.

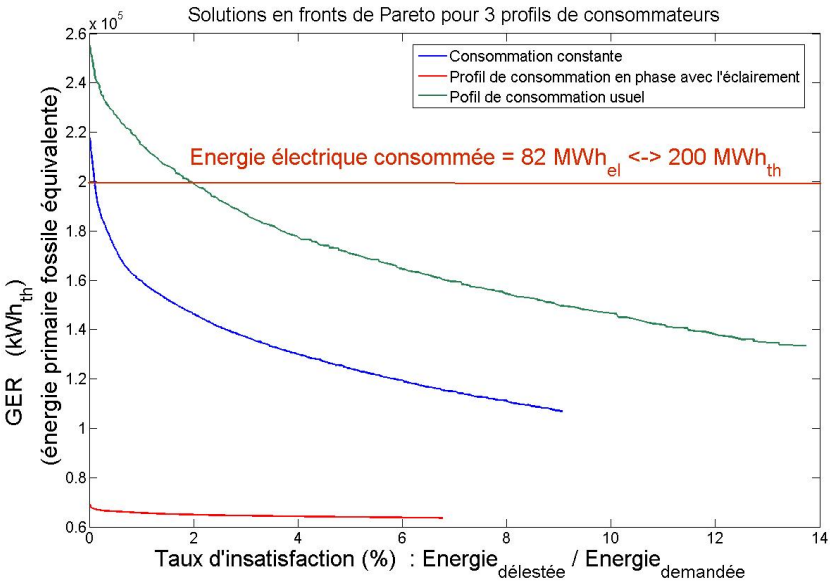

Figure 8: Résultats d'optimisation pour 3 profils caractéristiques

Il apparaît toutefois à la lecture des résultats d'optimisation que les solutions optimales de dimensionnement pour un profil solaire imposent systématiquement la présence d'une certaine quantité de batteries. A 0% de délestage par exemple, le profil solaire impose 9 kWh de batteries (Tableau 2).

Paramètres	Profil réel	Profil constant	Profil solaire
P_{PV}	12,77 kWc	10,38 kWc	4,86 kWc
$W_{BATTERIE}$	170 kWh	166,24 kWh	9,22 kWh
$P_{ONDULEUR}$	6,4 kVA	880 VA	4,4 kVA
Objectifs	**Profil réel**	**Profil constant**	**Profil solaire**
Taux d'insatisfaction (délestage)	0%	0%	0%
Coût énergétique global (GER)	256 MWh	218 MWh	69,3 MWh
Coût énergétique PV (P_{PV}*12500 kWh)	160 MWh	129 MWh	60,8 MWh

Tableau 2: Dimensionnement pour 3 profils de consommation à délestage 0%

C.Vers un profil optimal de consommation

Les données déterministes du profil de production, établies à partir des relevés de rayonnement solaire, de la température et du modèle du générateur photovoltaïque, restent les mêmes. Seule varie l'allure du profil de consommation.

La détermination, dans un premier temps, d'un profil « optimal » de consommation peut permettre de donner une idée de la façon dont il faudra modifier le profil d'un consommateur quelconque (du type « réel ») afin de minimiser à la fois le dérangement (modification du profil) et bien sûr le coût global sur cycle de vie.

Une première question se pose, comment se fait-il que le profil de consommation homothétique à la courbe de production solaire précédent ne soit pas totalement optimal ? Il apparaît que ceci est dû principalement au rendement non linéaire de l'onduleur. En effet, la production est donnée du côté DC de l'onduleur, alors que la consommation se fait en alternatif. Or, la Figure 3 qui donne le rendement de l'onduleur en fonction de la puissance de sortie montre le problème des consommations trop faibles. En particulier, pour avoir une consommation positive en sortie de l'onduleur, il est nécessaire de produire au minimum 43 W en entrée DC (autoconsommation). Il faut donc interdire de consommer lorsque la production est inférieure à ces 43 W car dans ces cas le recours aux batteries est obligatoire. Ce phénomène est à l'origine des 9 kWh de capacité de stockage donnés dans la solution optimale du Tableau 2 pour le profil « solaire ».

La Figure 3 et les 43 W de minimum de production sont valables pour un onduleur de 4,5 kVA. Or le dimensionnement de l'onduleur fait également partie des paramètres d'optimisation. Ceci implique que pour un profil de consommation donné, l'onduleur doit être dimensionné de façon à fournir au minimum le pic de consommation. Sans quoi la consommation sera écrêtée. En prenant en compte ces paramètres, on arrive à un coût énergétique minimal (à 0% de délestage) de 59,8 MWh, inférieur donc aux 69,3 MWh du Tableau 2. Cette configuration ne permettant pas au délestage d'améliorer le coût (si il y avait délestage ce serait en chaque point de consommation, ce qui n'est pas toléré par la contrainte de 10% maximum), toutes les solutions sont identiques : 4,49 kWc de panneaux photovoltaïques, pas de stockage et un onduleur de 4,4 kVA. Par comparaison, un système optimisé dont l'onduleur aurait un rendement unitaire ne « coûte » plus que 53,8 MWh d 'énergie fossile équivalente pour 4 kWc de panneaux photovoltaïques (onduleur de 4,4 kVA). Le délestage du consommateur restant nul.

Ce profil optimal, généré en inversant le modèle de l'onduleur, est ainsi devenu le coût de référence pour un profil de production et une consommation électrique totale donnés.

Mais le consommateur n'est pas aussi flexible que cela et il faut à présent pouvoir modifier des paramètres de gestion de la consommation tels que les décalages temporels acceptables propres à chaque appareil consommateur électrique, ou classe d'appareils. Le nombre de paramètres doit rester compatible avec l'utilisation d'un algorithme d'optimisation évolutionnaire. Or la décision de modifier le profil doit pouvoir être prise à chaque instant. La

conciliation d'une optimisation de la gestion pour chaque instant et de la limite du nombre de paramètres est un problème particulièrement ardu.

Le but de ce travail sur profils déterministes étant de nous rapprocher d'une gestion en temps réel, il faut pouvoir optimiser des paramètres qui permettront une décision particulière à chaque instant, en fonction par exemple de l'état de charge des batteries et du déficit de production à un instant donné.

La mise au point d'une telle capacité de prise de décision sera sans doute difficile, mais elle permettrait d'améliorer notablement les services rendus par une installation.

CONCLUSION

Nous avons exploité pour l'optimisation des systèmes de production d'électricité photovoltaïques autonomes un outil d'optimisation multi-objectifs qui fournit pour une situation donnée un ensemble de solutions de compromis optimales. Les simulations ont été effectuées sur de longs cycles de vie afin notamment de prendre en compte efficacement le vieillissement en cyclage des accumulateurs utilisés et la non linéarité des modèles.

Le couplage entre la production intermittente liée à la ressource et le stockage nécessaire à la satisfaction du consommateur introduit des échanges d'énergie complexes. Mais la simulation de ces flux instantanés d'énergie (approche temporelle) est nécessaire, en particulier du fait qu'ils sont liés au cyclage des accumulateurs, dont Alsema [ALS_99] a montré qu'ils contribuaient de façon significative au coût global de l'installation.

Les résultats d'optimisation, présentés sous forme de fronts de Pareto, ont mis en évidence l'importance des profils de consommation (à énergie fournie égale) sur le dimensionnement de l'installation. Mais la stratégie de gestion de la consommation reste très difficile à mettre au point en temps réel sans faire appel à un grand nombre de variables.

Les pertes aussi bien dans l'onduleur que dans l'accumulateur jouent un rôle majeur dans les résultats. Ainsi cet article montre l'importance que peut avoir l'expertise en génie électrique dans l'optimisation sur cycle de vie des installations de production d'électricité intermittente d'origine renouvelable.

Il est important de retenir que cet article se limite volontairement à l'optimisation d'une installation photovoltaïque en site isolé pour focaliser l'attention sur la méthode. Mais l'outil de dimensionnement « sur cycle de vie » peut s'appliquer à des configurations plus complexes, et notamment la gestion des flux d'énergie instantanés trouvera-t-elle une résonance importante dans le cas de systèmes multi-sources.

REFERENCES

[COP_93] – J.B. COPETTI, E. LORENZO, F. CHENLO, *"A general battery model for PV system simulation"*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 1, pp. 283-292 (1993).

[GER_03] – O. GERGAUD, G. ROBIN, B. MULTON, H. BEN AHMED, *"Energy modelling of a lead-acid battery within hybrid wind / photovoltaic systems"*, European Power Electronics (2003).

[DEB_01] – K. DEB, A. PRATAP, S. AGARWAL, T. MEYARIVAN, *"A fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II"*, IEEE Transactions on Evolutionnary computation, Vol. 6, April 2002.

[RYD_04] – C.J. RYDH, B. A. SANDEN, *"Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II:Energy return factors and overall battery efficiencies"*, Energy Conversion and Management 46, Elsevier (2004).

[ALS_99] – ALSEMA EA. *"Environnemental life cycle assessment of solar home systems"*, Report NWS-E-2000-15, Dept. Science Technology and Society, Utrecht Univ., NL (2000).

[SEI_06] – SEIGNEURBIEUX J., ROBIN G., BEN AHMED H., MULTON B., "Optimization with energy management of PB battery stand alone systems over the life cycle", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden., DE (2006).