

Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque

V.Boitier, C. Alonso

LAAS, CNRS, 7 Avenue du colonel Roche, 31071 Toulouse Cedex 04

email : vboitier@laas.fr tél : 05 61 55 86 89

Résumé : Cet article présente le dimensionnement d'une installation photovoltaïque de moyenne puissance chez un particulier. L'objectif de ce travail est de faire apparaître à travers un exemple simple les avantages mais aussi les contraintes liées à l'utilisation de l'énergie électrique photovoltaïque en site isolé. En particulier, les problématiques de la consommation, du stockage et de l'autonomie seront analysées. On montrera aussi la nécessité d'avoir une approche globale du système pour aboutir à un dimensionnement optimal en terme de coût.

Mots clés : énergie renouvelable, photovoltaïque, panneau solaire, chargeur, régulateur, batterie, rendement.

1. INTRODUCTION.

La figure 1 montre le schéma de principe d'une alimentation électrique autonome utilisant l'énergie solaire. Le flux de l'énergie est donné par les flèches. Les éléments composant un tel système seront tout d'abord présentés. La partie suivante explicitera les formules nécessaires au dimensionnement. Enfin, l'utilisation d'un tableau dans la dernière partie permettra de faire varier les paramètres pour optimiser le coût de l'ensemble.

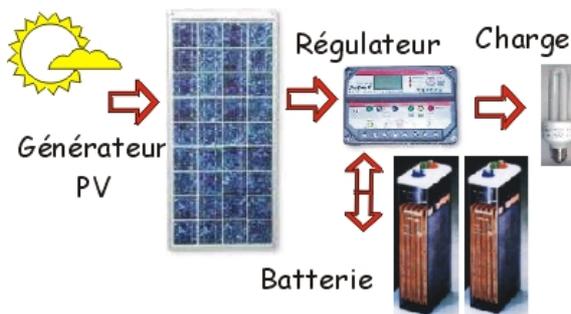


Fig. 1 Système photovoltaïque.

2. LES DIFFERENTS ELEMENTS DU SYSTEME.

2.1 L'utilisateur

Sur la figure 1 manque un élément primordial : l'utilisateur des charges. Il possède une maison au voisinage de Millau (Aveyron) et se caractérise par le profil de consommation suivant :

Hors vacances d'été, utilisation de la maison le week-end (2 jours d'utilisation pour 7 jours de recharge); en été utilisation tous les jours (compte tenu du climat, on souhaite 3 jours d'autonomie et une recharge complète en 8 jours). On désire :

- utiliser un réfrigérateur et un lave-linge (en été seulement pour ce dernier).
- disposer de l'éclairage (équivalent à 4 lampes à incandescence de 60W; utilisation maximale en hiver : 2h le matin et le soir de 17 à 22h soit 7h / j ; en été : le soir de 20 à 23 h soit 3h / j.

- utiliser un ordinateur portable 3 h par jour (le temps d'une décharge complète de sa batterie).
- utiliser un téléphone portable : la recharge se fera sur la batterie de la voiture.

Dans ce travail, on privilégie une solution uniquement photovoltaïque, néanmoins d'autres solutions sont envisageables (raccordement éventuel au réseau EDF, alimentation avec un groupe électrogène, réfrigérateur au gaz, éolienne, ...). Il conviendrait de les étudier pour trouver la meilleure solution en terme de coût et de service.

2.2 Les charges

Lampes

Pour minimiser l'énergie électrique consommée, la lampe retenue est une lampe fluorescente compacte (type STECA ESL11, alimentée en 12 V, consommant 11W électrique et fournissant 550 lumens -équivalente à une lampe de 60 W à incandescence-, prix d'un modèle équivalent : 23 €).

On trouve beaucoup plus facilement et donc moins cher (6€) dans le commerce des lampes de même type mais alimentées en 230V AC.

Réfrigérateur

Pour une application solaire, le choix d'un classe A s'impose. Peu commercialisés, dans la même gamme, les réfrigérateurs alimentés en DC sont deux à cinq fois plus chers à l'achat que les réfrigérateurs 230V AC classique [1]. Quand les réfrigérateurs à absorption (alimentés en 230V AC) ont une puissance d'environ 70 à 100 W les modèles utilisant un cycle à compression utilisés dans les applications solaires nécessitent une puissance de 25 à 50W mais avec un courant d'appel au démarrage de 3 fois le courant nominal.

A partir de la recherche faite sur un Internet dans la gamme 140 litres, un modèle classe A référencé ARC 0840 a été choisi (marque Whirlpool, 143 l, 0.32 kWh /j, 80 W, 372 €TTC) ; il est bien sûr nécessaire de lui adjoindre un onduleur pour adapter l'énergie de la batterie au réfrigérateur.

Une autre solution plus chère passe par l'acquisition d'un réfrigérateur alimenté directement par les batteries, ainsi la référence FRIRESO151/2 [2] convient : 12 ou 24 V, 140 litres, 0.32 kWh/j, 58 W, Classe A, 954 € TTC.

Lave linge

Pour limiter la consommation électrique, un modèle à bulle sera préféré à un modèle classique (80% de consommation d'énergie électrique en moins mais une consommation en eau doublée), l'eau chaude est directement fournie par une installation solaire thermique. La référence suivante a été choisie : lave linge Daewoo DWF-600M [3] puissance 320 W, consommation 160 Wh (contre 950 Wh pour un classe A classique [4]) et 130 l d'eau, 589 €TTC.

Ordinateur portable

Sa batterie est donnée pour 11.1 volts et 1000 mAh, on prendra un rendement global de la batterie de 0.7. Le chargeur de l'ordinateur a un rendement voisin de 0.9. L'autonomie est de 3 h environ.

2.3 Onduleur

Les caractéristiques principales d'un onduleur autonome sont les suivantes :

- la tension d'entrée (12V, 24V ou 48 V),
- la tension de sortie 230V AC à 50 Hz (parfois la forme d'onde est sinusoïdale, plus souvent carrée ou pseudo-sinusoïdale ce qui se traduit par une augmentation des pertes quand la charge est un moteur),
- la puissance nominale et la puissance en pointe (typiquement 50% de plus que la valeur nominale),
- le rendement (généralement > à 90% mais donné en fonctionnement nominal, et donc beaucoup plus mauvais pour une puissance inférieure),
- la consommation en mode veille (2 ou 3% de la puissance nominale [5]),
- les protections (court-circuit charge, chute de tension côté batterie),
- le prix (très variable selon le type et la puissance des charges utilisées, de 50 € pour 300 watts à 1000 € pour 800 watts).

2.4 Batteries

Notions de base.

On appelle capacité (C en Ampère Heure -Ah-), la quantité d'électricité qu'un accumulateur peut fournir. On parle de C_{10} ou C_{100} selon que le courant de charge ou de décharge est égal au 1/10 ou au 1/100 de la capacité ($I = C/10$ ou $I = C/100$). Plus une batterie est chargée ou déchargée avec un courant faible, plus sa capacité est importante. Ainsi, une batterie solaire OPzS Solar 190 a une capacité C_{240} de 200 Ah, C_{120} de 190 Ah et C_{10} de 128 Ah. Il faudra donc tenir compte du courant de décharge lors du dimensionnement.

Une période de charge et décharge est appelée cycle. Les performances d'une batterie s'évaluent aussi en fonction du nombre de cycles que la batterie peut

fournir à une profondeur de décharge déterminée. Moins les décharges seront profondes, plus le nombre de cycles possibles sera élevé. Le taux de décharge (DOD, depth of discharge) est le ratio d'ampère heure déchargé sur la pleine capacité de la batterie. Par exemple, si une batterie de 100 Ah (pleine capacité) voit sa capacité diminuer de 25 Ah, alors son taux de décharge est 25% et son taux de charge (SOC, state of charge) est 75%.

D'autre part, il faudra tenir compte de l'intensité maximum en charge qui, sur des batteries stationnaires au plomb, doit être limitée à 10% de la capacité en C_{10} .

Quel type de batterie?

Pour les applications solaires supérieures à quelques watts, le coût du stockage impose une technologie au plomb préférentiellement aux technologies NiCd ou NiMH.

Les batteries choisies seront de préférence :

- des batteries "fermées" (Valve Regulated Lead Acid) dans lesquelles l'électrolyte est stabilisé par un gel ou un matériau AGM (Absorbent Glass Mat) (1500 cycles à 100% de DOD, 7 ans d'espérance de vie @ DOD max 80%) ou
- des batteries à plaques tubulaires dites batteries "stationnaires", (1500 cycles à 100%, 12 ans d'espérance de vie @ DOD max 40%)

Les batteries de voiture sont moins chères mais n'acceptent pas de décharge profonde (50 % maximum) du fait de la minceur des plaques et présentent une autodécharge importante. Leur durée de vie est aussi plus faible (5 ans max @ DOD max 15%). L'investissement initial est moindre avec ce type de batterie mais sur le long terme, ce choix se révèle plus coûteux, par exemple M. Viloz montre qu'on obtient sur 20 ans un coût de 0.6 €/kWh contre 0.14 €/kWh avec des batteries tubulaires [6].

Quelle tension : 12, 24, 48V ou plus?

Pour les systèmes de petite puissance, une tension de 12 V est préférée, les récepteurs alimentés en 12 V étant plus fréquents. Mais au-delà de 2.5 kWh stocké, on passera en 24 V ou plus pour limiter les pertes ohmiques en gardant des sections de câble raisonnables.

Les batteries sont commercialisées en cellules de 2V, de 200 Ah à 3000 Ah ou en ensemble 12 V jusqu'à 400 Ah [7]. On évitera si possible de mettre en parallèle des batteries.

2.5 Régulateur de charges.

On retrouve sur la figure 2 les principaux éléments d'un chargeur de batterie utilisant l'énergie solaire. Le régulateur doit assurer des fonctions de protections :

- pour éviter une décharge de la batterie dans le panneau (diode by-pass),
- pour éviter une surcharge ou une décharge profonde de la batterie,
- en cas de court-circuit côté charge.

Son rôle est aussi de contrôler le transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge en fonction :

- de la disponibilité de la ressource et de l'état de charge de la batterie (classiquement trois phases de charge : C/10 ou I_{max}, floating, gazing),
- du caractère prioritaire ou non de la charge.

Des fonctions d'affichage sont aussi généralement disponibles [8], [9].

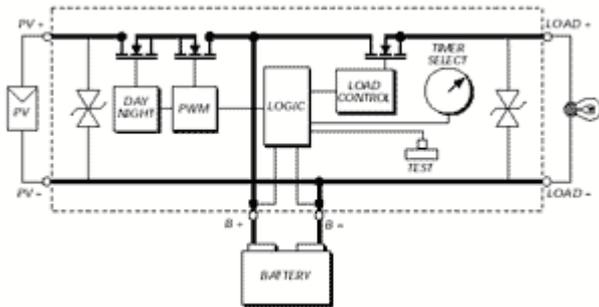


Fig. 2 Structure d'un régulateur de charge, extraite de la documentation du : SunLignht™, [10].

2.6 Générateurs photovoltaïques.

Les caractéristiques typiques d'un panneau photovoltaïque en silicium polycristallin [11] sont données sur la figure 3 ci-contre, S = 0.93 m², P_{max} = 125Wc @ 17.4V et 7.2A, I_{sc} = 8.0 A, V_{oc} = 21.7 V. Le maximum de puissance disponible est proportionnel à l'irradiation (ensoleillement exprimé en W/m²) et augmente lorsque la température diminue.

Pour utiliser au mieux le panneau on cherchera à le faire travailler au maximum de puissance disponible ; pour cela le régulateur, s'il inclut une fonction dite "MPPT" (maximum power point tracking) jouera le rôle d'adaptateur d'impédance entre le panneau et la charge [12].

Dans le cas d'une installation avec plusieurs panneaux, on rajoutera les protections adéquates (diodes) [13]. Le prix "grand public" des panneaux est d'environ 6 € le watt-crête. Un panneau prévu pour fonctionner sur 12 V, fournissant 80 Wc est disponible au prix de 489 € TTC [2].

Après avoir présenté les différents éléments composant un système PV, il reste à le dimensionner au mieux en fonction du cahier des charges.

3. DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTS ELEMENTS DE LA CHAINE.

Les applications numériques illustrant cette partie sont données pour un fonctionnement en hiver avec les lampes 12 volts, le réfrigérateur 230 V et le lave linge à bulles présentés précédemment ainsi qu'un onduleur de 800VA à 1017 € ayant un rendement η_{OND} de 0.93 en charge et une consommation à vide estimée à 2% de la

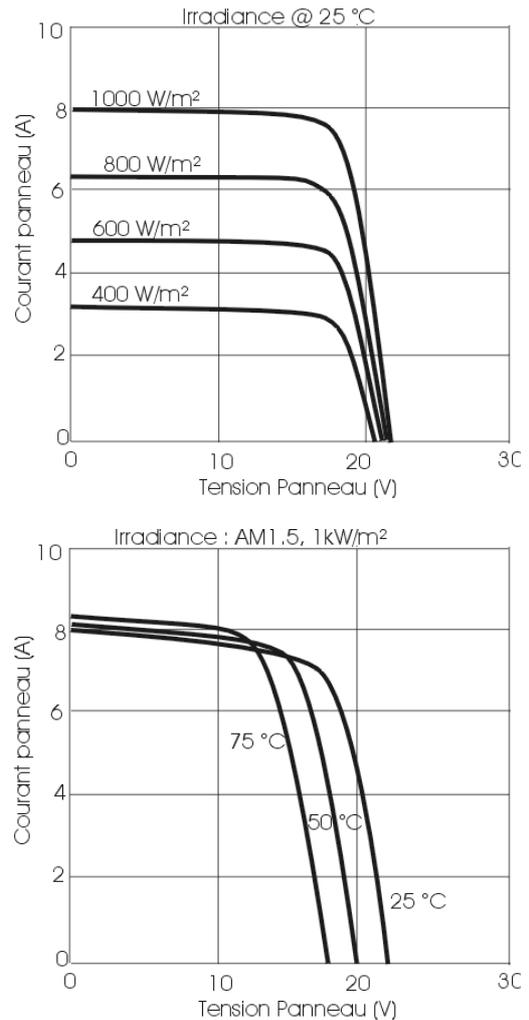


Fig. 3 Caractéristiques d'un panneau PV.

charge nominale P_N [5]. Le choix d'un onduleur apparemment surdimensionné est justifié car on ne connaît pas le cosφ des charges ni les courants de démarrage; cela permettra aussi l'utilisation occasionnelle de petits appareils fonctionnant en 230 V AC.

3.1 Charges

La consommation journalière des différentes charges est donnée directement par les constructeurs ou calculée à partir des puissances instantanées et des durées d'utilisation, ainsi :

$$E_{LUX} = 4 \times 11 \times 7 = 308 \text{ Wh/j}, E_{FROID} = 320 \text{ Wh/j}$$

$$E_{ORDI} = (11.1 \times 1) / 0.7_{(batterie)} / 0.9_{(chargeur)} = 18 \text{ Wh/j}$$

$$E_{LINGE} = 0 \text{ (utilisation en été seulement)}$$

La consommation de l'onduleur est la somme de sa consommation à vide et en charge :

$$E_{OND} = \frac{(1 - \eta_{OND})}{\eta_{OND}} (E_{FROID} + E_{ORDI}) + \frac{2}{100} P_N \cdot 24$$

$$\text{soit } E_{OND} = 409 \text{ Wh/j}$$

La consommation cumulée charges + onduleur est notée E_J; elle vaut dans ce cas : E_J = 1055 Wh/j.

Il faut noter l'importance de la consommation à vide de l'onduleur, pratiquement 50% de la consommation totale. Le choix d'un onduleur déconnectable ou avec de faibles pertes à vide est donc primordial.

3.2 Batterie

Pour simplifier l'étude, on englobera le rendement de charge et celui de décharge dans le rendement global de la batterie η_{BAT} (énergie fournie / énergie consommée), on en tiendra compte au niveau de la charge (i.e. comme si le rendement à la décharge était de 100%) ; l'énergie dite "de la batterie" sera donc une énergie effectivement disponible pour la charge (cf figure 4). Le rendement η_{BAT} dépend de nombreux paramètres et fluctue notamment avec l'état de charge de la batterie [14], une valeur approximative $\eta_{BAT} = 70\%$ convient.

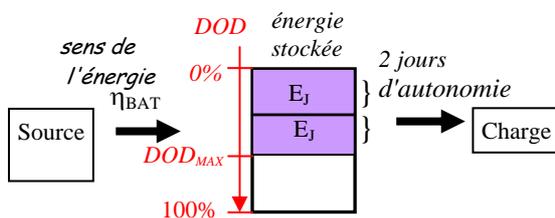


Fig. 4 Energie utilisable dans la batterie.

Chaque jour la batterie fournit l'énergie E_J . On note J_{AUT} , le nombre de jours d'autonomie souhaité. La batterie devra arriver à sa profondeur de décharge maximale autorisée DOD_{MAX} en J_{AUT} jours. L'énergie totale de la batterie sera donc E_{TOT} (Wh) avec :

$$E_J \cdot J_{AUT} = E_{TOT} \cdot DOD_{MAX}$$

Connaissant la tension V_{MOD} d'un module élémentaire, on en déduit facilement le nombre N de modules à placer en série pour obtenir la tension continue V_{BAT} souhaitée.

$$V_{BAT} = N \cdot V_{MOD}$$

La capacité C_{MOD} de chaque module élémentaire doit être suffisante pour éviter une mise en parallèle des modules ; la capacité de chaque module est alors égale à la capacité C_{BAT} de l'ensemble et doit vérifier

$$C_{BAT} \geq \frac{E_{TOT}}{V_{BAT}}$$

Par exemple, 2 modules Dryfit SB330 à 530 € 330 Ah sous 6V, 1200 cycles @ 60% dod, type étanche à électrolyte gélifié autorisent bien 2 jours d'autonomie (un calcul arrière donne 2.25 jours).

La puissance maximale consommée permet de calculer le courant maximal débité par la batterie, soit :

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{BAT}}$$

On vérifie que ce courant est bien inférieur à la valeur maximale autorisée, soit 1/10 de C_{10} .

De même, une fois les panneaux photovoltaïques et le régulateur choisis, il faudra vérifier que le courant de charge n'est pas trop fort pour la batterie.

Soit J_{REC} le nombre de jours nécessaires pour une recharge complète après J_{AUT} jours en autonomie. Pour recharger la batterie un jour où il fait beau, il faut lui fournir l'énergie nécessaire pour la consommation journalière plus une fraction permettant de compenser l'énergie puisée les jours de mauvais temps passés, soit une énergie par jour à donner à la batterie supérieure ou égale à E_{IN} avec :

$$E_{IN} = \frac{E_J}{\eta_{BAT}} \left(1 + \frac{J_{AUT}}{J_{REC}} \right)$$

Dans le cas où les jours d'utilisation et de recharge sont bien différenciés, l'énergie à injecter par jour de recharge s'écrit plus simplement :

$$E_{IN} = \frac{E_J}{\eta_{BAT}} \left(\frac{J_{AUT}}{J_{REC}} \right)$$

soit avec 2 jours d'autonomie pour 7 jours de recharge $E_{IN} = 431$ Wh.

3.3 Ressource énergétique

Pour utiliser au mieux les panneaux solaires, on les orientera plein Sud avec une inclinaison généralement voisine de la latitude [15], soit entre 43° et 44° pour une localisation à Millau. Par rapport à un panneau placé horizontalement, on peut montrer que cela entraîne une perte d'énergie de l'ordre de 15 % max pour juin, juillet, août mais un gain voisin de 50 % pour décembre, janvier.

La ressource est estimée à partir des mesures 2004 distribuées par Météo France relatives à l'énergie journalière fournie par le soleil sur un plan horizontal (figure 5).

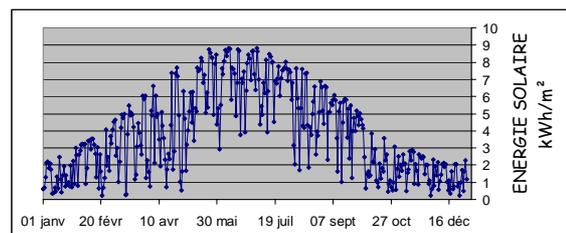


Fig. 5 Irradiation journalière à Millau.

L'application des coefficients de 15% et de 50% sur les données pondérées par mois donne un ensoleillement minimal moyen G_{MIN} de 4.4 kWh/m²/jour en été et de 2.0 kWh/m²/jour en hiver.

Les effets d'ombrage sur les panneaux [16] n'ont pas été pris en compte dans ce calcul.

3.4 Panneaux PV

En incluant les pertes du régulateur (rendement η_{REG} 90%), ainsi que celles par effet Joule dans les lignes (rendement η_L 95%), l'énergie E_{PV} fournie

journalièrement par les panneaux devra être (les jours de beaux temps) au moins égale à E_{PV0} ,

soit : $E_{PV} \geq E_{PV0}$

avec : $E_{PV0} = \frac{E_{IN}}{\eta_{REG} \eta_L}$

On introduit le rendement photovoltaïque η_{PV} , ratio entre le maximum de puissance électrique potentiellement disponible et la puissance lumineuse reçue. η_{PV} est voisin de 13% pour des panneaux actuels. L'énergie produite par une surface S de panneaux photovoltaïques dépend de la technologie des panneaux (à travers η_{PV}) mais aussi de l'aptitude de la commande du convertisseur à suivre le point de puissance maximum, on introduit pour en tenir compte un rendement de la commande noté η_{COM} ; généralement η_{COM} est voisin de 90%.

Au final, l'énergie disponible par jour en sortie du générateur photovoltaïque est :

$$E_{PV} = (G_{MIN} S) \eta_{PV} \eta_{COM}$$

On peut en déduire la surface S nécessaire pour satisfaire le besoin en énergie:

$$S > \frac{E_{IN}}{G_{MIN} \eta_{REG} \eta_L \eta_{PV} \eta_{COM}}$$

Soit $S > 2.2 \text{ m}^2$. Avec le panneau présenté au §2.3, 3 modules sont nécessaires, mais ce choix n'est pas optimum (on dispose de 2.8 m^2 au lieu des 2.2 m^2 nécessaires).

En fonction des tensions d'entrées du régulateur, on choisit alors la disposition en groupes série/parallèle des panneaux. Il reste à calculer le courant maximal total fourni par les panneaux et à vérifier que le chargeur est capable de le supporter. Ce courant est le produit du courant maximum d'un panneau multiplié par le nombre de groupe de panneaux en parallèle.

3.5 Calculs

Les calculs sont intégrés sur un tableur (Excel). Dans la feuille de calcul, on souhaite pouvoir modifier très facilement un élément du système ; la fonction *rechercheh* convient car elle permet de choisir facilement entre deux produits d'une même famille. On présente ci-dessous deux extraits de la feuille de calcul. Sur le premier, figurent les caractéristiques de deux panneaux; un numéro leur est associé, de même pour les conditions d'utilisation (cf figure 6). C'est une mini base de données.

Sur le deuxième extrait (cf figure 7), on saisit le numéro correspondant au panneau choisi et celui relatif aux conditions d'utilisation souhaitées (zones bleues), les parties encadrées sont alors automatiquement adaptées et les calculs sont mis à jour.

PANNEAUX	1	2
marque	Kyocera	sharp
prix €	800	752
puissance W	125	123
lcc A	8	8,12
Vopt	17,4	17,2
surface panneau m ²	0,93	0,99
rendement panneau	0,13	0,12
technologie	multicristallin	multicristallin
je le trouve chez		solarsud

METEO	1	2
irradiation mini Wh/m ² /j	hiver	juin à août
inclinaison de 45°	2000	4400

Fig. 6 extrait n°1 de la feuille de calcul.

n° de colonne du module panneau choisi	1
rendement PV	0,13
surface panneau m ²	0,93
puissance W	125
courant max A	8,00
prix d'un panneau €	800
n° de colonne des dates d'utilisation	1
période d'utilisation	hiver
ensoleillement G min Wh/m ² /j	2000
calculs	
énergie minimale fournie par le soleil Wh/j	4305
surface nécessaire m ²	2,15
nombre de panneaux (calcul non arrondi)	2,31
nombre de panneaux	3
courant max -mise en // - (A)	24
puissance max instantanée W	375

Fig. 7 extrait n°2 de la feuille de calcul.

L'utilisation du tableur permet aussi de modifier facilement les spécifications demandées (profil de consommation, autonomie, durée de recharge ...) et de voir leur impact sur les éléments du système notamment la capacité totale de stockage, la surface de générateurs photovoltaïques et le prix.

A titre d'exemple d'utilisation, on compare trois cas : cas A, on choisit les charges ayant la consommation la plus faible et fonctionnant si possible en 12 V (lampes 12 V, ordinateur portable, frigo 12V et lave linge à bulle).

cas B, 800 € d'économie par rapport au cas A : lampes 230 V AC basse consommation, ordinateur portable, frigo 230V classe A et lave linge classique classe A.

cas C, encore 20€ d'économisé !...idem cas B mais avec des lampes 60 W à incandescence à la place des fluocompactes.

La figure 8 présente les résultats obtenus pour les configurations (cf §2.1) vacances d'été (été) et hors

vacances (hiver). Le prix global comprend le prix des lampes, de l'onduleur, du réfrigérateur, du lave-linge, des batteries, du régulateur de charge, des panneaux. Il ne comprend pas le prix de l'ordinateur ni celui des câbles, des bâtis et de la main d'œuvre.

	Conso Wh/j	C batterie Ah sous 12V	Surface panneau m ²	Total €
cas A Hiver	1031	300	2,2	5 390
cas A Été	1027	428	10,5	12 036
cas B Hiver	1079	300	2,3	4 676
cas B Été	1911	796	19,5	19 113
Cas C Hiver	2544	707	5,4	7 866
Cas C Été	2489	1037	25,4	24 879

Fig. 8 Exemples de résultats comparatifs.

Les chiffres contenus dans ce tableau mettent en évidence les faits suivants :

- Il convient de rechercher les charges les moins gourmandes possible en énergie pour minimiser le coût total de l'installation, même si cela nécessite l'achat d'appareils électroménagers moins couramment distribués et donc chers. En corollaire, on comprend qu'une gestion rigoureuse de l'énergie s'avère nécessaire (pas de lampes inutilement allumées...).
- La continuité de service est extrêmement coûteuse, en effet on constate qu'à consommation similaire une installation utilisée en permanence (été) est dans les cas étudiés de 2 à 3 fois plus chère qu'une installation utilisée par intermittence (les week-ends), en dépit d'un apport supérieur du soleil en été.

En jouant sur le nombre de jours d'autonomie et sur le nombre de jours de recharge, on appréhende facilement que la capacité totale de la batterie est proportionnelle à la consommation journalière et à l'autonomie souhaitée alors que la surface des panneaux varie avec la capacité de la batterie et à l'inverse du nombre de jour de recharge.

Remarque : Les prix des produits utilisés sont des prix "Web" et donc pas forcément les plus bas du marché...

4. CONCLUSION

Cette étude type "bureau d'étude au service d'un client" a été menée sur 20h avec des étudiants de licence professionnelle "conception et commande des systèmes embarqués" par groupe de deux ou trois

Lors de cette étude les étudiants ont dû :

- identifier et extraire les paramètres utiles à partir des documents techniques disponibles (papier /Web). La notion de capacité d'une batterie et les calculs liés à cette notion ont posé des difficultés, de même que la non linéarité des caractéristiques I(V) et P(V) du générateur photovoltaïque.
- analyser une chaîne énergétique complète avec les différents rendements associés. La rigueur nécessaire

pour descendre ou remonter le long de la chaîne énergétique en identifiant bien les différents éléments n'est pas toujours suffisante.

- utiliser un tableur pour minimiser le paramètre de coût à service rendu donné. Le passage par le calcul formel pour utiliser correctement un tableur a été aussi une contrainte pour certains.

Enfin, ils ont également été, nous l'espérons, sensibilisés aux problématiques liées aux énergies renouvelables (avantages, inconvénients, domaines d'utilisation).

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Notton, M. Muselli, "Utilisation rationnelle de l'énergie et énergies renouvelables, des alliés incontestables : application à une production décentralisée d'électricité photovoltaïque", disponible sur <http://scholar.google.com/> (mots clefs Notton Muselli)
- [2] <http://www.solarsud.com>
- [3] <http://www.surtec.fr>
- [4] T. Salomon, S. Bedel, "La maison des [néga] watts", Ed. Terre vivante, 2003.
- [5] <http://www.librelec.fr>
- [6] M.Villoz, Document Energies Renouvelables / SSES, No 3/2004, mai 2004, "Batteries au plomb: choisir la bonne technologie", p. 26-27, disponible : http://solar-club.web.cern.ch/solar-club/Vehicules/batteries/SSES_batt.html
- [7] www.matrixenergy.ca
- [8] SOLAR BOOST™ 2000, <http://www.rvpowerproducts.com>.
- [9] Solar Lighting Controller Model LS-2, <http://www.solarconverters.com/>
- [10] <http://morningstarcorp.com>
- [11] <http://www.kvocerasolar.de/products/>
- [12] C.Alonso, B. Estibals, H. Valderrama-Blavi, "An overview of MPPT (Maximum Power Point Tracking) controls and their future developments", 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC'2002), Dubrovnik (Croatie), 9-11 Septembre 2002, 11p.
- [13] Anne Labouret, Michel Villoz, "Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel", Ed. Dunod, 2003.
- [14] O. Gergaud, B. Multon et Al., "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", séminaire du GDR Production d'énergie décentralisée du 27-28 janvier 2003 à Toulouse.
- [15] Jacques Bernard, "Energie Solaire", Coll. Génie Énergétique, Ed. Ellipses, 2004.
- [16] logiciel PVSyst <http://www.pvsyst.com/>