



HAL
open science

Modélisation à long terme et optimisation du stock d'énergie des installations solaires autonomes

A. Maafi, C. Delorme

► **To cite this version:**

A. Maafi, C. Delorme. Modélisation à long terme et optimisation du stock d'énergie des installations solaires autonomes. *Journal de Physique III*, 1996, 6 (4), pp.511-527. 10.1051/jp3:1996138 . jpa-00249474

HAL Id: jpa-00249474

<https://hal.science/jpa-00249474>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Modélisation à long terme et optimisation du stock d'énergie des installations solaires autonomes

A. Maafi (*) et C. Delorme

Énergie-Climat, Université d'Avignon, 33 rue Louis Pasteur, 84000 Avignon, France

(Reçu le 28 février 1995, révisé le 3 janvier 1996, accepté le 12 janvier 1996)

PACS.84.60.-h – Direct energy conversion and storage

Résumé. — Une approche de dimensionnement de la capacité de stockage des installations solaires autonomes a été développée. Elle est basée sur l'analyse de la différence entre l'énergie incidente et la consommation requise. Cette méthode a été mise au point à partir de données journalières d'irradiation globale enregistrées ou reconstituées sur plan horizontal dans les stations météorologiques d'Abidjan (Côte d'Ivoire), d'Alger et de Tamanrasset (Algérie) et de Carpentras (France). Pour une demande énergétique correspondant à la production moyenne pluriannuelle d'énergie solaire, les résultats montrent qu'un stockage de plusieurs mois est requis pour garantir l'autonomie de fonctionnement des installations solaires implantées à Alger, Carpentras et Tamanrasset. L'autonomie ainsi obtenue n'est pas économiquement rentable. Aussi, la taille du stockage a été minimisée en utilisant un stock initial d'énergie au démarrage de l'installation et en réduisant la consommation. Ceci a permis de montrer que la couverture de besoins énergétiques planifiés à l'aide d'installations solaires autonomes, compétitives sur le plan économique, est possible.

Abstract. — A sizing approach of storage capacity for autonomous solar systems has been developed by analyzing the difference between solar radiation input and energy demand on long-term periods. This approach has been implemented using series of daily global irradiation data recorded or generated on a horizontal surface in the meteorological stations of Abidjan (Ivory Coast), Algiers and Tamanrasset (Algeria) and Carpentras (France). The obtained results show that for an energy demand equaling the pluriannual mean of solar irradiation a storage of several months is needed to obtain the autonomy of solar systems located in Algiers, Carpentras and Tamanrasset. It should be too expensive investment to set-up such solar systems in these locations. Therefore, the size of the storage is minimized by using a non-zero initial energy storage and reducing the energy demand. This procedure show that it is possible to provide every day a programmed energy using autonomous solar systems which are competitive economically.

1. Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire pour satisfaire des demandes énergétiques planifiées pose le problème du dimensionnement du stockage d'énergie des installations utilisées à cet effet.

Pour résoudre ce problème un certain nombre de travaux basés pour la plupart sur l'étude des propriétés du rayonnement solaire ou sur les types de consommation énergétique ont été

(*) Auteur auquel doit être adressée la correspondance : Institut d'Électronique (USTHB), B.P. 17 Hassen BADI 16200 Alger, Algérie

développés. Ces travaux aboutissent à des techniques de dimensionnement variées et relatives aux cas étudiés [1-8]. Devant l'absence d'une solution universelle à ce problème, une approche de dimensionnement du stock d'énergie des installations solaires a été élaborée. Elle est basée sur la recherche de conditions d'équilibre à long terme entre l'énergie solaire incidente et la consommation requise.

De façon générale, plusieurs facteurs conditionnent la mise en œuvre de cette approche. Il s'agit essentiellement de la climatologie du site retenu pour l'implantation des systèmes, de leurs configurations et des consommations à satisfaire. En réalité cette étude aborde le problème du stockage en considérant des installations solaires autonomes travaillant à poste fixe. Le choix de ce type d'installations est motivé par le fait qu'il est largement utilisé dans les sites isolés où il est économiquement compétitif par rapport au type de systèmes utilisant l'énergie conventionnelle. L'objectif recherché est de définir pour un site donné la taille d'une installation qui puisse subvenir régulièrement à une demande minimale d'énergie fixée à l'avance. Le stockage requis par ce type d'installations pourrait alors servir de critère de qualification de sites pour l'implantation des systèmes énergétiques solaires.

Pour mettre au point cette technique de dimensionnement, des mesures journalières de l'irradiation globale enregistrées sur une longue période sont indispensables. De telles mesures ne sont généralement disponibles que pour le plan horizontal. Aussi, des données journalières d'irradiation globale enregistrées sur plan horizontal à Carpentras, Alger et Tamanrasset ont été utilisées. Le même type de données a été reconstitué pour Abidjan, puis utilisé dans cette étude [9].

Les fluctuations de l'irradiation solaire influencent considérablement le comportement du stock d'énergie des installations solaires autonomes. La gestion efficace de ce dernier nécessite la connaissance de son évolution à long terme. Dans cet article, la modélisation des variations du stock d'énergie des installations solaires autonomes qui a été mise au point à partir des données d'irradiation globale est présentée et les résultats obtenus sont analysés. En outre, l'application de cette modélisation au dimensionnement du stockage des systèmes photovoltaïques et sa validation expérimentale sont décrites.

2. Caractérisation des sites

Rappelons que les données journalières $E(j)$ d'irradiation globale (précisons que j varie de 1 à n et que n est la longueur de la série exprimée en nombre de jours) enregistrées sur plan horizontal sont disponibles pour les sites du tableau I. Celui-ci regroupe pour chaque site, ses coordonnées géographiques, la période de mesure et la moyenne journalière pluriannuelle $\langle E \rangle$ des données $E(j)$. Celle-ci est obtenue à l'aide de l'expression suivante :

$$\langle E \rangle = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N E(p) \quad (1)$$

avec

$$E(p) = \frac{1}{M} \sum_{d=1}^M E(d) \quad (2)$$

Dans les relations (1) et (2), $E(d)$ et $E(p)$ représentent respectivement l'irradiation globale au d -ème jour de l'année et la moyenne journalière d'irradiation globale de l'année p . M est le nombre de jours de l'année (365 ou 366) et N est le nombre d'années de la période de mesure.

Pour mettre en évidence les caractéristiques climatiques des sites du tableau I, les histogrammes des données $E(j)$ ont été représentés sur la figure 1 et l'évolution de la moyenne $E(p)$

Tableau I. — *Coordonnées géographiques, périodes de mesure et moyennes pluriannuelles pour les sites pris en considération.*

[Geographic coordinates, period of measure and pluriannual average of the daily irradiation for the considered sites.]

Site	Latitude	Longitude	Période	$\langle E \rangle$ (Wh)
Abidjan	05, 15° N	03, 93° W	1970/75	5180
Tamanrasset	22, 78° N	05, 52° E	1970/83	6500
Tahifet	22, 88° N	06, 00° E	1992	5800
Alger	36, 72° N	03, 25° E	1972/82	4305
Carpentras	44, 05° N	05, 03° W	1969/89	4195

au cours des années sur la figure 2. Notons que le site de Tahifet n'a pas été pris en compte dans cette caractérisation en raison du nombre réduit de mesures. Celles-ci seront utilisées ultérieurement dans le paragraphe 6.

L'allure des histogrammes d'Alger, de Carpentras et de Tamanrasset permet de déceler l'existence de deux modes caractérisant deux saisons dominantes dans le climat de ces sites. Pour Abidjan, un seul mode dominant est apparent traduisant l'existence d'un climat régulier tout au long de l'année.

Par ailleurs, les diagrammes de la figure 2 mettent en évidence deux caractéristiques de la moyenne $E(p)$:

- d'une part, sa variabilité d'une année à l'autre,
- d'autre part, sa stabilité pour des séquences d'années.

Compte tenu de ces observations et des histogrammes de la figure 1, il ressort que la production d'énergie solaire dans les sites pris en considération est fortement influencée par les effets saisonnier et pluriannuel. Il est donc intéressant d'étudier les conséquences de ces effets sur le comportement du stock d'énergie des installations solaires autonomes.

3. Critères de modélisation du stock

3.1. CONFIGURATION DES INSTALLATIONS. — Considérons une installation énergétique solaire transformant le rayonnement incident en énergie consommable. Étant donné que tout transfert d'énergie s'accompagne de pertes, le rendement de l'installation est inférieur à l'unité. La production énergétique de cette installation est fortement liée aux variations du rayonnement solaire. Elle ne peut donc satisfaire régulièrement une demande d'énergie fixée à l'avance que si elle est dotée d'un stockage d'énergie. Celui-ci absorbe les excès de production d'énergie et fournit l'énergie nécessaire quand le rayonnement incident est insuffisant. Ainsi, l'installation doit pouvoir fonctionner de façon autonome sans apport extérieur d'énergie, c'est à dire sans source d'appoint.

Pour normaliser les résultats de modélisation, considérons une installation solaire de référence dont la surface des convertisseurs est égale à 1 m² et dont le rendement global est assimilé à l'unité. Cependant ces hypothèses peuvent être modifiées pour correspondre à des cas pratiques moyennant un ajustement de la surface des convertisseurs d'énergie et des rendements de l'installation.

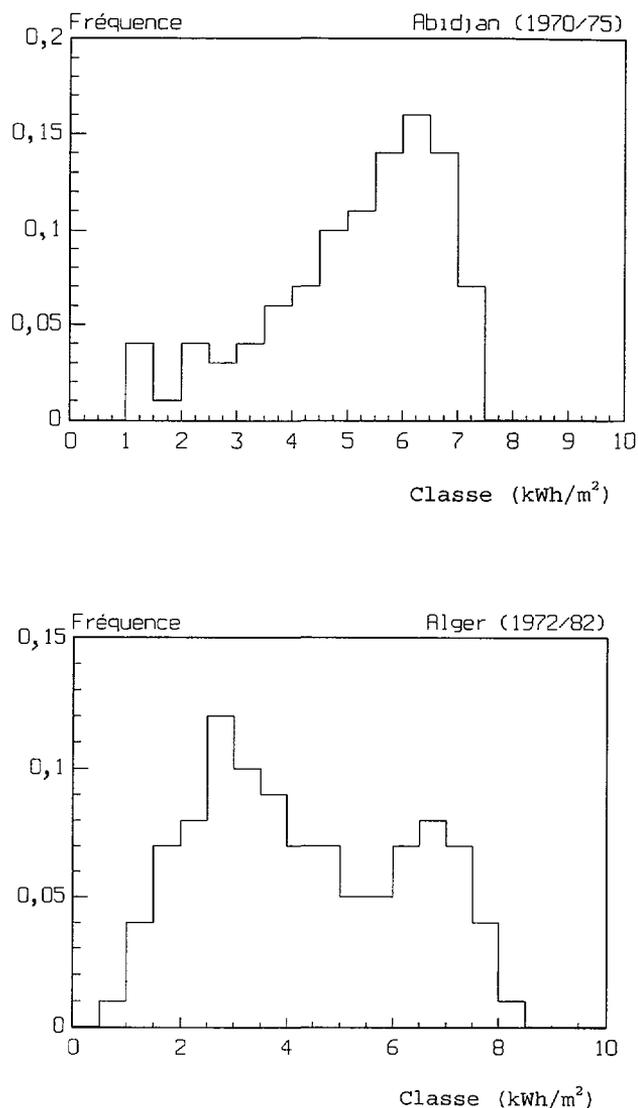


Fig. 1. — Histogrammes des données $E(j)$.

[Histograms of $E(j)$ data.]

3.2. DEMANDE ÉNERGÉTIQUE. — La modélisation du stock d'énergie des installations solaires nécessite la connaissance de la consommation énergétique. De façon générale, celle-ci varie en fonction des saisons, du lieu et de l'utilisation envisagée. Pour mettre au point cette modélisation, une consommation constante d'énergie est adoptée. Celle-ci correspond à la production moyenne pluriannuelle d'énergie solaire du lieu considéré. Ce choix est motivé par la recherche d'un équilibre énergétique entre l'irradiation globale incidente et la consommation requise qui faciliterait la réalisation de l'autonomie de l'installation.

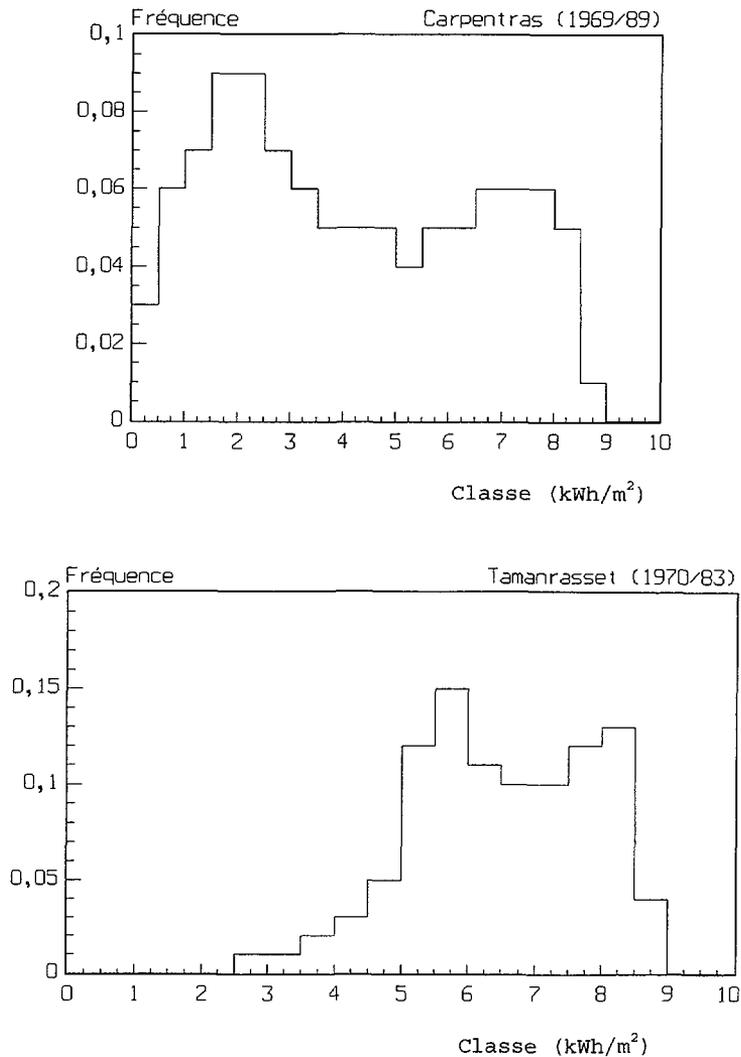


Fig. 1. — (Suite)

4. Modélisation du stock d'énergie

Rappelons que l'objectif de la modélisation est de déterminer la taille du stock d'énergie, sans pertes, nécessaire pour assurer sur plusieurs années la couverture des besoins constants. Compte tenu des conclusions du paragraphe 2, la modélisation sera mise en œuvre à l'échelle annuelle puis journalière.

4.1. MODÉLISATION DU STOCK ANNUEL. — Dans cette modélisation l'unité de temps est l'année. Pour une année donnée p , l'installation reçoit une quantité d'énergie annuelle $\xi(p)$ et fournit une énergie égale à la moyenne annuelle $\langle \xi \rangle$, obtenue sur une période de N années

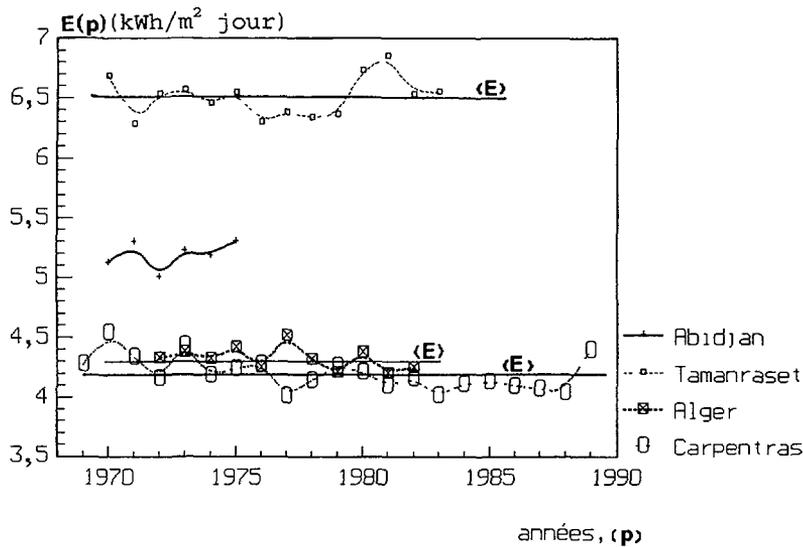


Fig. 2. — Évolution de la moyenne $E(p)$ au cours de la période d'étude pour chaque site.
[Variations of the yearly mean $E(p)$ for the considered sites.]

consécutives. Celle-ci s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$\langle \xi \rangle = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \xi(p) \quad (3)$$

Soit $\Delta(p, N)$ l'écart annuel d'énergie cumulée pendant N années. Celui-ci s'écrit :

$$\Delta(p, N) = \Delta(1) + \Delta(2) + \dots + \Delta(p) + \dots + \Delta(N) \quad (4)$$

Dans la relation (4), $\Delta(p)$ désigne l'écart annuel d'énergie de l'année p par rapport à la moyenne $\langle \xi \rangle$. Il s'exprime par :

$$\Delta(p) = \xi(p) - \langle \xi \rangle \quad (5)$$

L'évolution du stock d'énergie $\Delta(p, N)$ fait apparaître un maximum et un minimum. La différence entre ces valeurs extrêmes notée $R(N)$, s'identifie à la taille maximum du stock d'énergie. Elle s'exprime par :

$$R(N) = \max_{1 \leq p \leq N} \Delta(p, N) - \min_{1 \leq p \leq N} \Delta(p, N) \quad (6)$$

$R(N)$ est la dimension du stock d'énergie recherché pour assurer l'autonomie de fonctionnement de l'installation.

Cette modélisation a été mise en œuvre pour Carpentras et Tamanrasset. La figure 3 représente l'évolution du stock d'énergie au cours de la période d'étude pour ces deux sites. Une analyse sommaire du diagramme correspondant à Carpentras montre qu'en partant d'un stock initial nul, la réserve d'énergie se constitue peu à peu au cours du temps pour se dépenser progressivement, accusant un déficit entre 1988/89. La valeur estimée de R vaut 350 kWh. Elle

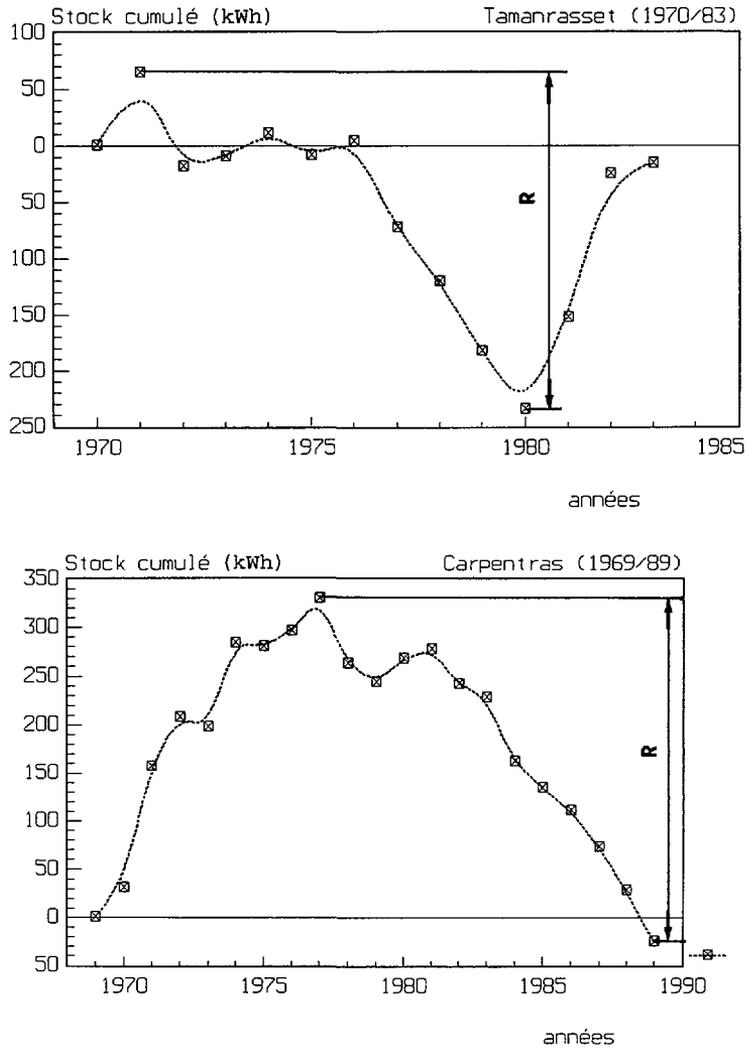


Fig. 3. — Évolution du stock d'énergie cumulée au cours de la période d'étude pour Carpentras et Tamanrasset.

[Variations of the accumulated energy for Carpentras and Tamanrasset.]

correspond à une consommation moyenne d'énergie égale à 1 530 kWh par an. Une analyse similaire du diagramme de Tamanrasset montre un stock initial nul et l'existence de fluctuations du stock d'énergie caractérisées par un déficit prononcé entre 1976 et 1980. La valeur estimée de R vaut 300 kWh. Elle correspond à une consommation moyenne d'énergie égale à 2 370 kWh par an.

Les résultats obtenus ne permettent pas de tirer des conclusions définitives à cause du nombre réduit de données annuelles qui sont disponibles (21 données pour Carpentras et 14 données pour Tamanrasset). Toutefois, ils mettent en relief la contribution de chaque année et les effets des séquences d'années, à forte ou à faible production d'énergie solaire par rapport à la

Tableau II. — Valeurs du stock d'énergie pour les sites étudiés.

[Values of the energy storage for the considered sites.]

Site	Abidjan	Tamanrasset	Alger	Carpentras
$r(\text{kWh})$	170	495	415	735

moyenne annuelle, sur le comportement du stock d'énergie. Par ailleurs, cette approche ne tient pas compte de l'effet saisonnier dans la production d'énergie solaire. La prise en compte de cet effet est importante dans le dimensionnement du stockage puisque les installations étudiées sont prévues pour fonctionner quotidiennement tout au long de l'année. Une modélisation à l'échelle journalière du stock d'énergie permet d'intégrer les fluctuations journalières du rayonnement solaire et sa tendance saisonnière ainsi que l'effet pluriannuel induit par les séquences d'années.

4.2. MODÉLISATION DU STOCK QUOTIDIEN. — Le principe de cette modélisation est semblable à celui utilisé précédemment. Par contre, l'échelle de temps est réduite à la journée. Pour étudier le comportement du stock d'énergie, il suffit de se fixer la consommation quotidienne prévue et de faire le bilan en suivant l'évolution de la série de mesures de l'énergie incidente $E(j)$. En effet, soit $D(j, n)$, l'énergie cumulée pendant une séquence de n jours. Celle-ci s'écrit :

$$D(j, n) = D(1) + D(2) + \dots + D(j) + \dots + D(n) \quad (7)$$

Dans cette relation, $D(j)$ représente l'écart d'énergie au jour j , tel que :

$$D(j) = E(j) - \langle E \rangle \quad (8)$$

$\langle E \rangle$ étant définie par la relation (1).

Soit $r(n)$ l'écart observé entre le maximum et le minimum de $D(j, n)$ dans son évolution au cours du temps. $r(n)$ s'exprime alors par la relation suivante :

$$r(n) = \max_{1 \leq j \leq n} D(j, n) - \min_{1 \leq j \leq n} D(j, n) \quad (9)$$

La signification physique de $r(n)$ est semblable à celle donnée à $R(N)$. Il s'agit de la dimension du stock d'énergie, sans pertes, assurant sans défaillance la couverture d'une demande journalière fixée.

L'application de cette approche a permis de déterminer les dimensions du stock d'énergie pour les sites étudiés en partant d'un stock initial nul. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau II. Les valeurs de r sont élevées pour être compétitives économiquement. Compte tenu du fait que r s'identifie à la dimension maximum du stock d'énergie, il serait intéressant de rechercher une manière de réduire ce stock tout en lui permettant d'assurer son rôle.

5. Minimisation du stock d'énergie

Dans le cas des installations étudiées, il est possible d'envisager une minimisation du stock d'énergie :

- soit en résorbant le déficit énergétique de l'installation en la dotant d'un stock initial d'énergie,
- soit en réduisant la demande énergétique.

Il est également intéressant de combiner les deux possibilités.

Tableau III. — Valeurs minimums du stock d'énergie pour les sites étudiés.

[Minimum values of the energy storage for the considered sites.]

Site	Abidjan	Tamanrasset	Alger	Carpentras
$D(1)(\text{kWh})$	70	310	115	200

Tableau IV. — Autonomie de fonctionnement en nombre de jours.

[The system autonomy expressed in number of days of storage.]

Site	Abidjan	Tamanrasset	Alger	Carpentras
s (jours)	14	48	27	48

5.1. RECHERCHE DE LA VALEUR DU STOCK INITIAL. — Il s'agit de déterminer le stock initial d'énergie $D(1)$ disponible au démarrage de l'installation pour lui permettre de répondre à la demande énergétique sans défaillance. Il doit vérifier les deux conditions suivantes :

Condition initiale :

$D(1)$ est choisi tel que pour tout n , l'inégalité $D(j, n) \geq 0$ soit vérifiée.

Condition de saturation :

le premier jour $D(j, n) = D(1)$

Les jours suivants Si $D(j, n) > D(1)$ alors $D(j, n) = D(1)$

La valeur du stock initial d'énergie a été estimée pour les sites du tableau I, en utilisant les relations (7) et (8) et compte tenu des conditions initiale et de saturation. Le tableau III donne les valeurs de $D(1)$ ainsi obtenues. De façon générale, les valeurs de $D(1)$ sont nettement inférieures aux valeurs de r correspondantes. Par conséquent, elles réalisent l'autonomie de fonctionnement des installations étudiées à moindre coût.

Pour évaluer le coût de l'autonomie des installations, les valeurs de $D(1)$ ont été traduites en nombre de jours de stockage s . Celui-ci est obtenu à l'aide de l'expression suivante :

$$s = \frac{D(1)}{\langle E \rangle} \quad (10)$$

Le tableau IV regroupe les valeurs de s pour les sites étudiés. Notons que le paramètre s correspond au nombre de jours successifs où le stock initial d'énergie couvre les besoins de consommation sachant que la production journalière d'énergie solaire est très défaillante. Les valeurs de s montrent que l'autonomie des installations est moins coûteuse à réaliser à Alger qu'à Tamanrasset. D'autre part, les installations implantées à Carpentras et Tamanrasset présentent les mêmes caractéristiques économiques en termes d'autonomie de fonctionnement, en dépit du fort ensoleillement disponible à Tamanrasset. Pour interpréter ces résultats, il faudrait déterminer la contribution des effets saisonnier et pluriannuel sur le stock d'énergie.

Pour mettre en évidence l'effet saisonnier et compte tenu du fait que le comportement du stock d'énergie $D(j, n)$ est fortement conditionné par l'évolution de l'irradiation globale au cours de l'année, l'estimation de $D(1)$ a été effectuée à l'échelle annuelle. Ainsi, les années ayant la plus forte production d'énergie solaire ($E(p) > \langle E \rangle$) et celles comptabilisant la plus faible production d'énergie ($E(p) < \langle E \rangle$) ont été considérées. Le tableau V regroupe les

Tableau V. — *Tableau comparatif des stocks optimums d'énergie correspondant aux années à faible ou à forte production d'énergie solaire.*

[Comparison of the optimum values of energy storage related to years with small or large solar energy production.]

Site	Tamanrasset	Alger	Carpentras
Année à faible production d'énergie solaire	1971	1979	1977
$D(1)$ (kWh)	85	127	157
Année à forte production d'énergie solaire	1981	1977	1970
$D(1)$ (kWh)	0	96	146

résultats d'estimation. Ces derniers montrent l'existence d'un effet saisonnier dont l'importance est fonction de la latitude et dont l'intensité est plus forte dans le cas des années à faible production d'énergie solaire. Par ailleurs, la comparaison des valeurs de $D(1)$ présentées respectivement dans les tableaux III et V, montre qu'à Alger et Carpentras l'effet saisonnier est prédominant tandis que l'effet pluriannuel est faible à Carpentras et négligeable à Alger. Par contre, l'effet pluriannuel est dominant à Tamanrasset alors que l'effet saisonnier est limité à une faible contribution dans ce site. Les diagrammes de la figure 2 corroborent ces conclusions puisqu'ils mettent en évidence l'existence de séquences d'années à faible production d'énergie solaire pour Tamanrasset et Carpentras. Ceci prouve que la valeur du stock d'énergie $D(1)$ est imposée par l'effet dominant qu'il soit saisonnier ou pluriannuel.

5.2. RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION. — Le principe de minimisation du stock d'énergie s'opère en combinant la recherche de la valeur du stock initial d'énergie $D(1)$ décrite au paragraphe 5.1 et la réduction de consommation introduite dans la modélisation par le biais de la relation (8) modifiée de la manière suivante :

$$D(j) = E(j) - a\langle E \rangle \quad (11)$$

Dans cette expression a désigne le coefficient de consommation qui varie de 0 à 1.

Pour mettre en évidence l'effet de réduction de consommation sur le stock, la valeur du coefficient a , initialement égale à l'unité, a été diminuée progressivement par pas de 0,05 lors du processus de calcul des valeurs de $D(1)$. Les résultats de cette simulation sont schématisés sur la figure 4. Ils montrent qu'une réduction de la demande énergétique conduit à une minimisation du stock $D(1)$. Ainsi, une diminution de 5 % à Tamanrasset réduit le stock $D(1)$ au dixième de sa valeur. Une diminution de la consommation de 20 % à Alger et Carpentras réduit le stock $D(1)$ de moitié. Dans le cas d'Abidjan, une réduction de 5 % suffit pour réaliser l'autonomie de fonctionnement des installations avec un stock initial nul.

Pour illustrer ces résultats, les histogrammes donnant les écarts journaliers $D(j)$ pour les différents sites ont été représentés sur la figure 5. Une répartition non symétrique des écarts journaliers est observée entre les valeurs positives et négatives. Elle met en évidence le déficit qu'il faudrait réduire ou résorber à l'aide du processus de réduction de la demande énergétique. Un tel processus engendre un déplacement des histogrammes vers la partie positive. Ceci est

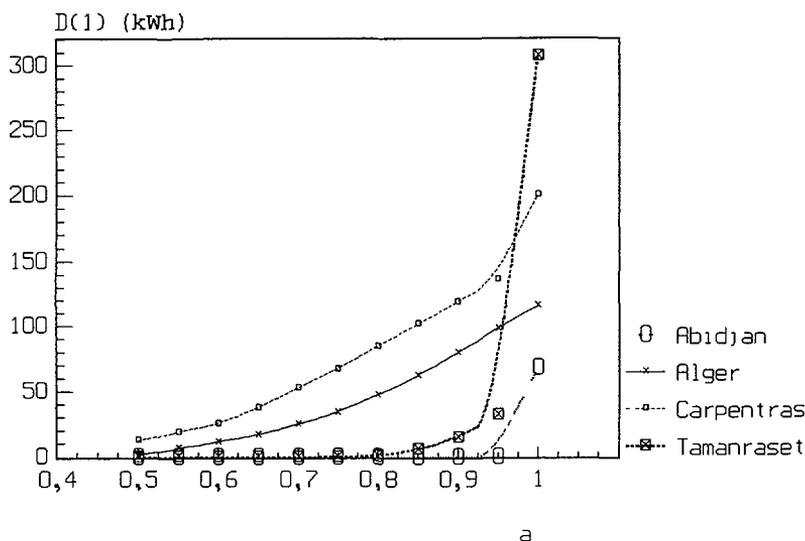


Fig. 4. — Effet de la réduction de la consommation sur le stock d'énergie.

[Effect of reducing the energy demand on the energy storage.]

dû au fait que les écarts négatifs engendrés par la consommation $\langle E \rangle$ se transforment en écarts positifs en réduisant cette dernière.

Par ailleurs, la réduction de la demande énergétique permet de rapprocher la moyenne pluriannuelle $\langle E \rangle$ de la moyenne $E(p)$ déduite des données de l'année à plus faible production d'énergie solaire de la période de mesure considérée. Cette opération permet d'éliminer l'énergie induite dans le stock par l'effet pluriannuel. C'est bien le cas de Tamanrasset où une faible réduction de consommation provoque une chute des valeurs de $D(1)$. La poursuite de la diminution de la demande énergétique conduit à de faibles valeurs de $D(1)$ traduisant l'élimination de la contribution de l'effet saisonnier. Ainsi, les diagrammes de la figure 4 font apparaître ce phénomène dont l'intensité varie d'un site à l'autre. De façon générale, la distribution des écarts $D(j)$ et l'évolution du stock d'énergie $D(1)$ en fonction de la réduction de la consommation $\langle E \rangle$ permettent d'identifier dans le stockage, les quantités d'énergie induites par les effets pluriannuel et saisonnier.

6. Application aux systèmes photovoltaïques

Bien que la méthode qui vient d'être décrite soit théorique, elle peut cependant s'appliquer à des installations réelles telles que, par exemple, celles qui fournissent de la chaleur ou de l'électricité à partir de la conversion de l'énergie solaire.

Pour les applications pratiques, le dimensionnement du stockage doit conduire à la détermination de la capacité de stockage. Cette opération dépend, entre autres, de la forme d'énergie stockée, i.e. calorifique, électrique, L'application étudiée concerne la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire et le stockage électrochimique de l'énergie convertie. Pour une installation de ce type, les pertes d'énergie les plus importantes concernent essentiellement la conversion et le stockage. La prise en compte de ces pertes peut se faire par l'introduction de rendements et de facteurs correctifs dans le modèle de dimensionnement.

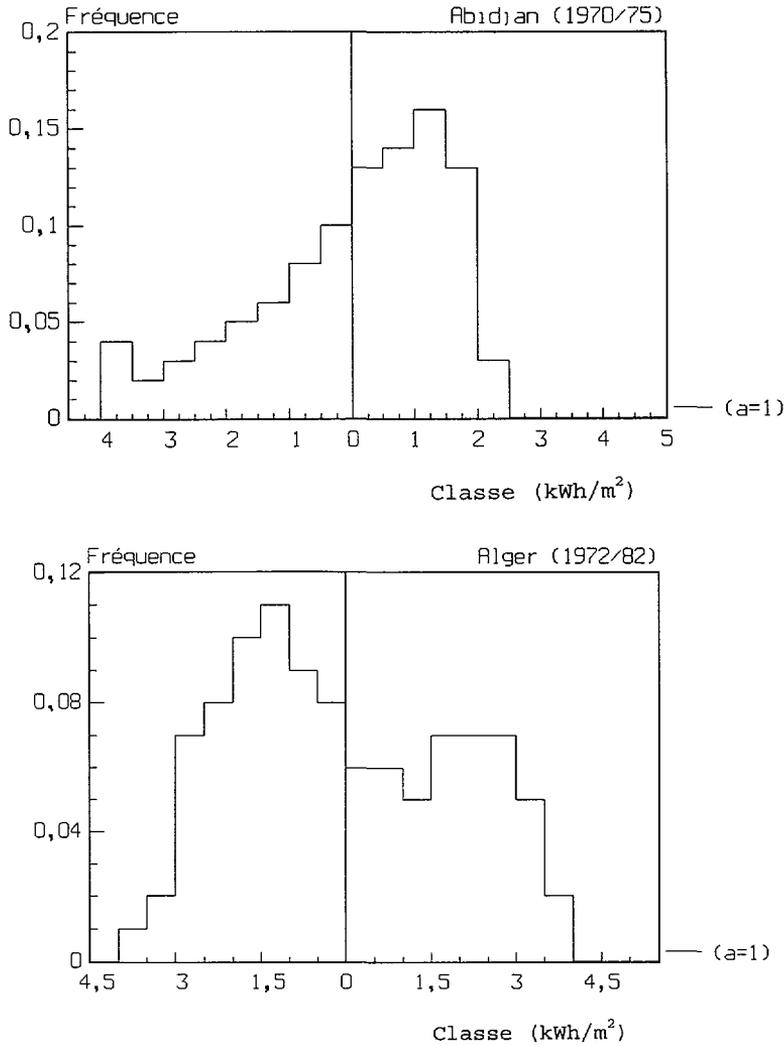


Fig. 5. — Histogrammes des écarts $D(j)$ pour les différents sites.

[Histograms of $D(j)$ deviations for the considered sites.]

6.1. DIMENSIONNEMENT DE LA CAPACITÉ DE STOCKAGE. — La capacité de stockage C des accumulateurs se calcule selon les étapes de la procédure suivante :

- Calcul du stock d'énergie cumulée $D(j, n)$ en utilisant l'équation (7) et l'expression (11) modifiée dans laquelle les pertes de conversion sont prises en compte à l'aide du rendement journalier $\eta(j)$ du générateur photovoltaïque, telle que :

$$D(j) = \eta(j)E(j)S - a\langle E \rangle \tag{12}$$

Dans cette relation S désigne la surface effective du générateur photovoltaïque dont la valeur est fixée en relation avec la demande énergétique à satisfaire. Il est à noter qu'à défaut de valeurs journalières, les rendements $\eta(j)$ peuvent être remplacés par leur valeur moyenne.

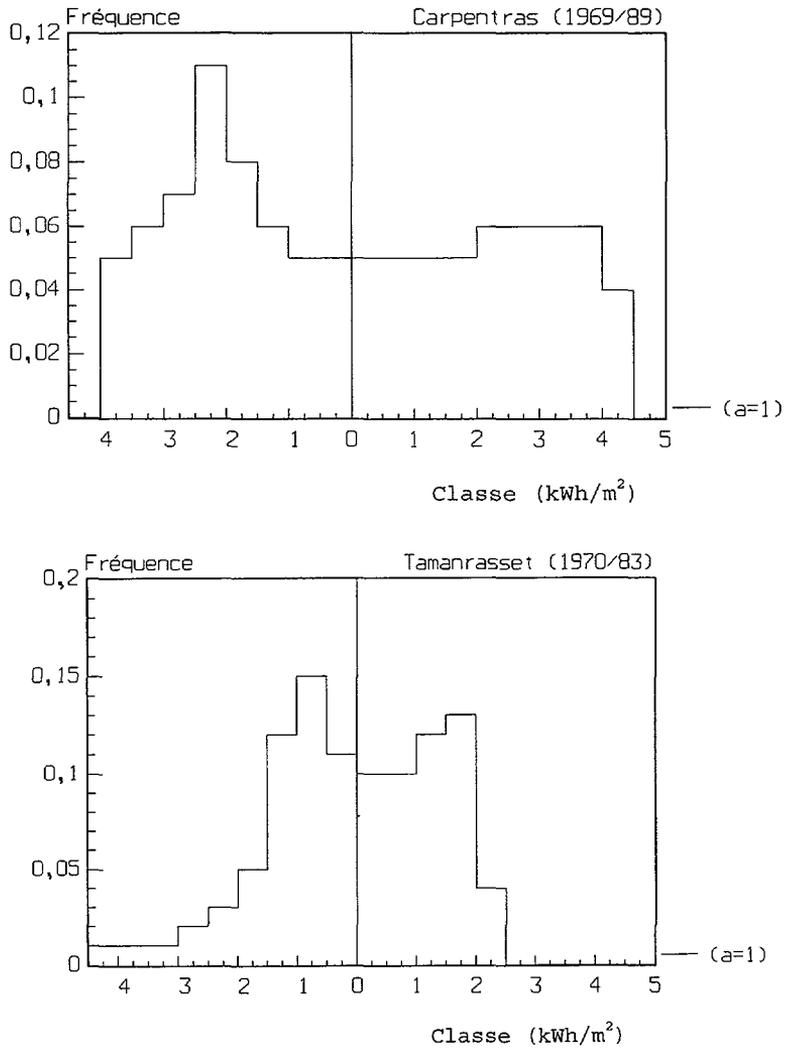


Fig. 5. — (Suite).

- Recherche du stock initial d'énergie $D(1)$ en tenant compte des conditions initiale et de saturation (paragraphe 5.1).
- Détermination de la capacité de stockage C des batteries d'accumulateurs en utilisant la relation suivante :

$$C = \frac{D(1)}{U_0 PD_{max} Bt} \tag{13}$$

U_0 , PD_{max} et Bt désignent respectivement la tension nominale, la Profondeur de Décharge maximum et le coefficient de correction de température.

La profondeur de décharge est le pourcentage de capacité déchargée. En pratique, pour les accumulateurs les plus classiques, la profondeur de décharge maximum admise est de 80 %.

Les basses températures engendrent des pertes de capacité par augmentation de la viscosité

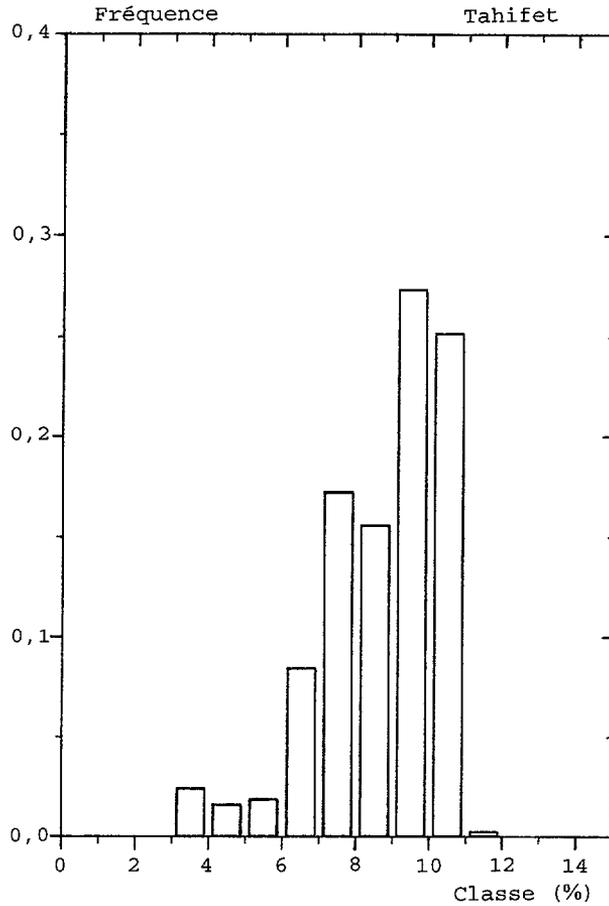


Fig. 6. — Histogramme des rendements journaliers $\eta(j)$ du générateur photovoltaïque installé à Tahifet.

[Histograms of $\eta(j)$ efficiencies of the P.V. generator installed in Tahifet.]

de l'électrolyte. Elles font également chuter la tension des accumulateurs par augmentation de leur résistivité. Pour des batteries au plomb par exemple, les pertes de capacité sont de 0,6 % par degré Celsius pour les températures inférieures à 25 °C. Un coefficient Bt égal à 0,9 permettrait de tenir compte des pertes de capacité pour des températures atteignant 8 °C. Les températures excessives risquent de provoquer des pertes de capacité et d'énergie par auto-décharge qui est due à des réactions parasites. Ce type de pertes n'a pas été pris en considération en raison de la difficulté de le quantifier pour l'application envisagée. Il est utile de mentionner que pour les systèmes photovoltaïques installés dans les zones désertiques, les batteries d'accumulateurs sont souvent enterrées en vue d'une limitation des pertes provoquées par les écarts importants de température.

6.2. EXPÉRIMENTATION. — La question posée est la détermination de la capacité des batteries d'accumulateurs qu'il faudrait associer à un générateur photovoltaïque expérimental pour constituer une installation autonome en mesure de couvrir les besoins d'énergie d'un foyer

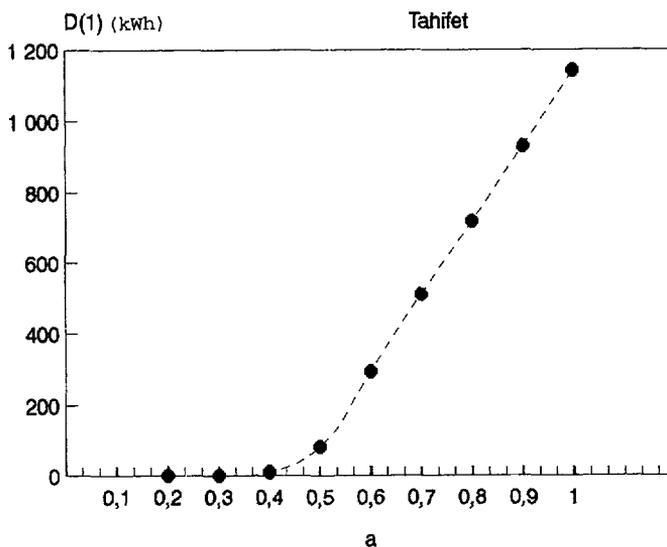


Fig. 7. — Évolution du stock d'énergie $D(1)$ en fonction de la réduction de la consommation $\langle E \rangle$ pour Tahifet.

[Behaviour of the energy storage $D(1)$ as a function of the energy demand for Tahifet.]

situé dans le village de Tahifet près de Tamanrasset. Ce générateur expérimental est d'une puissance de 720 watts-crête et il a une surface effective de $5,4 \text{ m}^2$. Il est constitué de 16 modules photovoltaïques au silicium monocristallin de 45 watts-crête chacun. Il est orienté vers le sud et est incliné d'un angle égal à 10° par rapport au plan horizontal [10]. Les rendements $\eta(j)$ sont obtenus à partir des mesures de l'irradiation globale reçue par le générateur et de l'énergie convertie. La figure 6 montre la distribution de ces rendements qui se regroupent entre 9 % et 11 %. La disponibilité de ces derniers permet l'application de la relation (12) et par conséquent l'estimation du stock initial $D(1)$ pour différentes consommations. L'évolution de $D(1)$ en fonction de la réduction de la demande énergétique $\langle E \rangle$ à partir de sa valeur initiale 5,8 kWh est représentée sur la figure 7. On retrouve la décroissance typique déjà mise en évidence dans le cas des autres sites (Fig. 4). Toutefois pour Tahifet, la décroissance de $D(1)$ en fonction de la réduction de $\langle E \rangle$ n'est pas abrupte telle que celle observée pour Tamanrasset. Ceci est dû à l'absence de l'effet pluriannuel. La figure 7 montre que pour une consommation de 5,8 kWh correspondant à $(a = 1)$ dans la relation (12) —le stock d'énergie $D(1)$ est estimé à 1140 kWh. Cette valeur est économiquement rejetable. Pour une demande énergétique de 2 kWh correspondant aux besoins quotidiens de consommation domestique d'un foyer en milieu rural isolé— le stock initial d'énergie est évalué à 8,6 kWh. C'est cette valeur qui sera adoptée dans le calcul de la capacité de stockage. Il est à noter qu'une consommation de 2 kWh par jour est proche de la moyenne journalière de l'énergie convertie par le générateur photovoltaïque. Le dimensionnement de la capacité des accumulateurs a été effectué à l'aide de la relation (13). Il en résulte une capacité de 500 Ah pour une batterie d'accumulateurs au plomb dont la tension nominale est 24 V. L'expérience a montré que cette capacité qui assure une autonomie de fonctionnement à l'installation légèrement supérieure à 4 jours, a permis au système photovoltaïque de fonctionner durant toute l'année 1993 sans défaillance.

7. Conclusion

Les résultats qui viennent d'être présentés montrent que le stockage à long terme d'une installation solaire autonome est plus sensible aux variations lentes de l'irradiation solaire, qu'elles soient saisonnières ou pluriannuelles, qu'aux fluctuations journalières. Il est donc nécessaire de disposer de longues séries de données –d'une décennie ou plus– pour mettre en évidence la contribution de l'effet pluriannuel dans l'estimation du stock d'énergie. Cette contribution qui peut être très importante, comme c'est le cas à Tamanrasset, a été généralement négligée dans les méthodes de dimensionnement du stockage.

Une première estimation du stock d'énergie suffisant pour assurer une consommation quotidienne, sans défaillance, conduit à des valeurs qui correspondent à plusieurs mois de stockage (Tab. II). Cette approche n'est pas économiquement rentable. Pour pallier à cet inconvénient, l'idée de l'utilisation d'un stock initial d'énergie et de la réduction de la consommation a été introduite dans la modélisation. Elle conduit à des installations dont la rentabilité économique est intéressante.

Pour minimiser le stock d'énergie nécessaire au fonctionnement autonome des installations solaires, d'autres techniques basées sur la mensualisation de la consommation [11] ou l'inclinaison des convertisseurs d'énergie d'un angle égal à celui de la latitude du lieu [12] peuvent être utilisées. Une combinaison de ces techniques avec l'approche qui vient d'être appliquée pourrait conduire à d'intéressants résultats.

Bien que l'expérimentation soit réalisée à la base d'une série de mesures d'une année, elle semble indiquer que la méthode qui vient d'être présentée permet le dimensionnement du stockage des installations solaires autonomes en réalisant un bon rapport Coût/Performance.

Bibliographie

- [1] Lestienne R., Application du modèle Markovien simplifié à l'étude du comportement du stockage d'une centrale solaire, *Revue Phys. Appl.* **14** (1979) 139.
- [2] Maafi A., Adane A. et Ouabdesselam A., Ajustement des données d'insolation d'Alger par un modèle Markovien du premier ordre, *Revue Phys. Appl.* **22** (1987) 425 ; Maafi A. et Adane A., A two-state Markovian model of global irradiation suitable for photovoltaic conversion, *Sol. Wind Technol.* **6** (1989) 247 ; Maafi A., Mise en évidence d'aspects physiques du modèle Markovien du premier ordre à deux états en météorologie solaire : Application à la conversion photovoltaïque, Thèse de Doctorat d'État, USTHB (Alger, 1991).
- [3] Chapman R.N., Development of sizing monograms for stand-alone photovoltaic/storage systems, *Sol. Energy* **43** (1989) 71.
- [4] Lasnier F. et Juen W.Y., The sizing of stand-alone photovoltaic systems using the simulation technique, *RERIC Inter. Energy J.* **12** (1990) 21.
- [5] Ashenayi K. et Ramakumar R., IRES- A program to design integrated renewable energy systems, *Energy* **15** (1990) 1143.
- [6] Ambrosone G., Catalanotti S., Coscia U. et Troise G., The SAPV simulation program, *J. Phys. III France* **1** (1991) 2001.

- [7] Lund P.D. et Peltola S.S., Solchips-A fast predesign and optimization tool for solar heating with seasonal storage, *Sol. Energy* **48** (1992) 291 ; Lund P.D., The energy storage problem in low energy buildings, *Sol. Energy* **52** (1994) 267.
- [8] Hadj Arab A., Ait Driss B., Amimeur R. et Lorenzo E., Photovoltaic systems sizing for Algeria, *Sol. Energy* **54** (1995) 99.
- [9] Delorme C.M. et Delorme C.H., La reconstitution des données d'ensoleillement à partir des données météorologiques courantes, *Entropie* **96** (1980) 14.
- [10] Guezzane S., Contribution de l'énergie solaire à l'électrification rurale, Conférence Internationale sur les Signaux et Systèmes (Alger) **2** (1994) VIII.1.
- [11] Delorme C. et Otmani A., Climatic energy management for an autonomous solar system in Africa, Energy and Environment into the 1990s, Proc. 1st World Renewable Energy Congress (Reading) Vol. 5 (A.A.M. Sayigh Ed., Pergamon Press, 1990) p. 2799.
- [12] Maafi A., Adane A. et Benghanem M., A two-state Markovian estimation of the size of photovoltaic systems, Energy and Environment into the 1990s, Proc. 1st World Renewable Energy Congress, Reading Vol. 1 (A.A.M. Sayigh Ed., Pergamon Press, 1990) p. 284.