

Dimensionnement et Optimisation Technico-économique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage

Ahmed El Khadimi¹, Lahsen Bchir² et Abdelouhab Zeroual²

¹ Institut National des Postes et Télécommunications, Rabat, Maroc

² Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

Résumé - Dans ce papier, nous présentons d'une part, une méthode qui permet de déterminer la taille et l'optimisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien. D'autre part, nous déterminons la configuration technico-économique optimale en utilisant deux scénarios. Le premier scénario utilise la moyenne des valeurs mensuelles par an, alors que, le deuxième scénario introduit la notion du mois le plus défavorable. Pour une charge fixe de 10 kWh/j, le premier scénario donne un coût plus faible par rapport au deuxième scénario. Les résultats obtenus montrent également que l'utilisation d'un système photovoltaïque comme système d'appoint avec un système éolien engendre une augmentation du prix du système hybride pour le site de Dakhla.

Abstract - In this paper we present a method that permits to determine the size and the optimization of a photovoltaic-wind hybrid system; and the optimal technico-economic configuration using two scenarios. The first one uses the yearly monthly average value, whereas, the second scenario introduces the notion of the most unfavourable month. The proposed method shows that the system cost for the first scenario is lower than the second one. The results obtained using photovoltaic system as principle system aided by wind system, show an increase of the cost for the site of Dakhla.

Mots Clés: Système hybride – Dimensionnement - Energie solaire - Energie éolienne - Technico-économique.

1. INTRODUCTION

L'utilisation d'un aérogénérateur ou un système photovoltaïque peut ne pas subvenir à lui seul aux besoins énergétiques souhaités. En effet, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire peut nous faire défaut au moment où nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement d'une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'appoint.

Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant comme système d'appoint un groupe électrogène, un groupe diesel ou autres dont le fonctionnement dans ces installations est lié à la nature des besoins [1-7]. Un système d'appoint à base d'énergie fossile réduit la capacité de stockage nécessaire et le coût, mais d'une part, il nécessite la maintenance et le carburant et d'autre part, il présente comme inconvénients le bruit et la pollution.

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système photovoltaïque - éolien (PV-E) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement [2].

Les installations d'énergie solaire photovoltaïque par leur caractère d'autonomie doivent être dimensionnées pour qu'elles fournissent de l'énergie continuellement durant toute l'année. Ce qui exige la détermination du nombre de modules nécessaires pour le mois le plus défavorable de l'année. Et par conséquent, on assiste à un surplus d'énergie pour le reste des mois et à une augmentation considérable du coût du projet [3].

Les périodes de l'année ayant une faible insolation correspondent à celles ayant un meilleur potentiel éolien. Il est donc évident qu'une complémentarité entre l'énergie éolienne et solaire est souhaitable et que le couplage de ces deux sources d'énergies est la solution la plus sûre et la moins coûteuse pour des systèmes autonomes d'électrification [4].

L'objectif principal de cette étude est de dimensionner et optimiser un système hybride PV-E, en introduisant deux scénarios qui se basent sur les moyennes mensuelles et les moyennes du mois le plus défavorable de l'année.

2. SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE - EOLIEN (PV-E)

Le système couplé PV-E a été simulé en utilisant des données synthétiques de l'irradiation solaire et de la vitesse du vent collectées du 1^{er} janvier 1985 au 31 décembre 1995, pour le site de Dakhla, situé au sud du Maroc, (latitude = 23°45'N, longitude = 15°56'W, altitude = 10 m).

L'intérêt d'un tel couplage est d'avoir plus d'énergie, mais, comme pour tout système solaire, le risque demeure d'avoir trop d'énergie à certains moments et pas assez à d'autres (absence de vent par ciel couvert, par exemple). Il s'agit donc, par l'intermédiaire d'un système de stockage, d'emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et de le restituer lors des périodes de manque d'apport [7, 8].

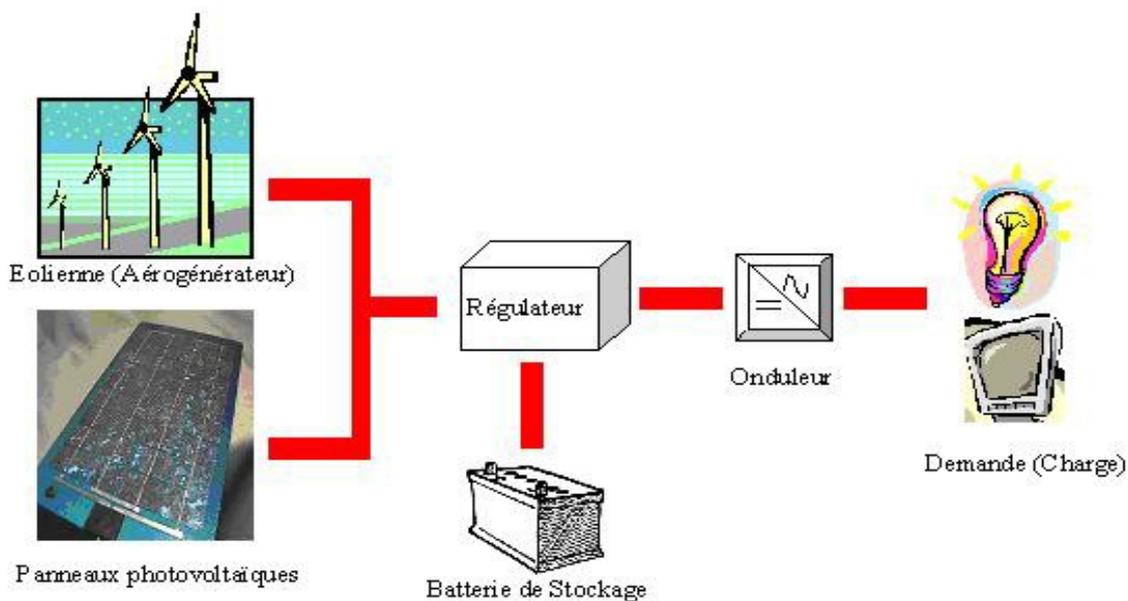


Fig. 1: Schéma d'un système PV-E

Pour faire cette analyse, nous définissons un système de conversion complètement intégré qui combine les deux sortes d'énergies. Ce système contient la conversion d'énergie solaire et éolienne, qui est ensuite relié au stockage et à la demande comme le schématise la figure 1 [9].

2.1 Eléments constitutifs du système hybride

Les systèmes PV-E comprennent généralement :

- un système générateur,
- un système de régulation,
- un système de stockage,

- des équipements de puissance,
- une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs. Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu.

La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas [10],
- l'éolien, très variable [11].

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

3. METHODE DE DIMENSIONNEMENT HYPOTHESES TECHNICO-ECONOMIQUES

L'étape essentielle dans la conception d'un système couplé est la détermination de sa taille optimale qui dépend essentiellement des données climatiques du site. Généralement, on utilise les moyennes mensuelles des données climatiques et / ou une estimation du nombre de jours consécutifs de faible ressource climatique (vent, irradiation solaire) pour déterminer la surface de l'aérogénérateur, la taille des panneaux photovoltaïques et la capacité des batteries. Or, le comportement dynamique du système couplé vis-à-vis de la nature stochastique de l'irradiation solaire influe d'une manière remarquable sur la taille du système nécessaire pour une application déterminée [7, 12].

En tenant compte de ces deux facteurs, et dans le but d'optimiser un système couplé, on a réalisé une simulation qui utilise les valeurs journalières de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire pour évaluer l'énergie produite par le système. Pour tenir compte de la nature stochastique de la vitesse du vent, et du rayonnement on a considéré une année de référence des deux grandeurs [10].

3.1 Les données climatiques et l'énergie demandée

Les performances des panneaux photovoltaïques et des aérogénérateurs sont directement corrélées aux données climatiques qui sont en principe l'irradiation solaire et la vitesse du vent. Pour un profil de charge donné, la taille du système augmente quand les ressources climatiques sont faibles.

Généralement, la grandeur de la demande en énergie est une fonction variable du temps. Dans notre cas, on a adopté une valeur de la consommation journalière constante durant la saison. Par ailleurs, nous nous sommes limités au cas des systèmes de faible ou moyenne puissance qui correspond au cas des applications domestiques, où la consommation est de l'ordre de 1 à 10 kWh par jour.

3.2 Performance du système et détermination du mois le plus défavorable

L'énergie mensuelle produite par le système est représentée par e_{pv} pour le photovoltaïque et e_e pour l'éolien (les deux composantes s'expriment en kWh/m²) et Q_d l'énergie demandée [9].

Dans un premier temps, nous avons calculé le mois le plus défavorable du système qui est une fonction de la charge mensuelle. Nous déterminons le mois le plus défavorable pour le système photovoltaïque seul et pour le système éolien seul durant l'année. On note S_{pv} et S_e

les surfaces respectivement des panneaux et de l'aérogénérateur qui peuvent produire une couverture de 100 % de la charge durant le mois le plus défavorable :

$$S_{pv} = \text{Max} \left(\frac{Q_d}{e_{pv}} \right) \quad (1)$$

$$S_e = \text{Max} \left(\frac{Q_d}{e_e} \right) \quad (2)$$

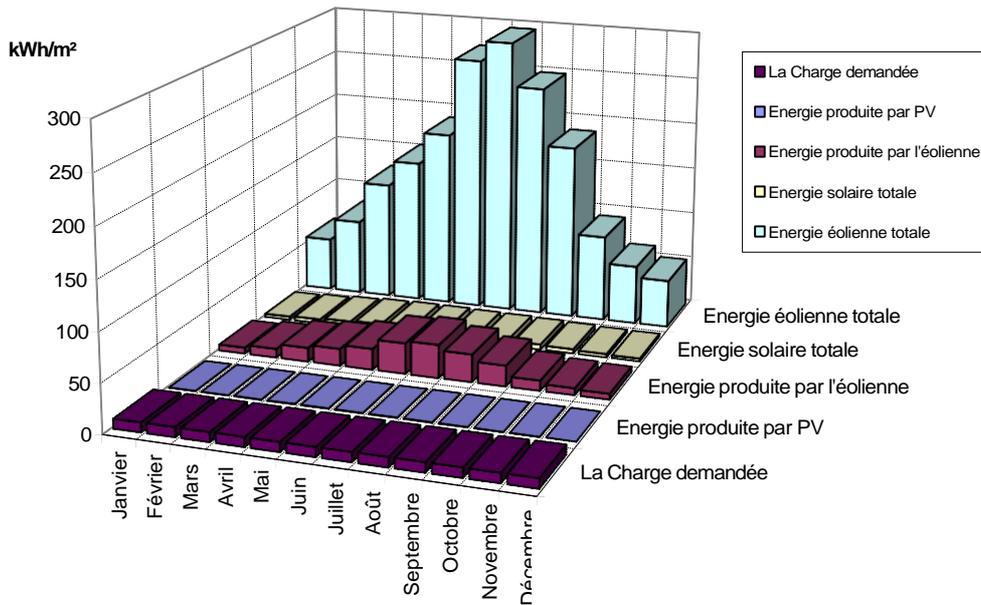


Fig. 2: Données mensuelles de l'énergie solaire et éolienne et performance du système hybride

Du fait que la charge demandée est constante, pour chaque saison, pour les données éoliennes et photovoltaïques; les résultats montrent que le mois le plus défavorable est le mois pour lequel l'énergie spécifique récupérée est minimale. On constate d'après ces résultats que le mois le plus défavorable est le mois de décembre pour les deux sources d'énergies éolienne et solaire.

3.3 La taille des composants renouvelables

En utilisant les deux sources renouvelables, la charge est divisée en deux parties. Si la fraction de la charge donnée par le système PV est f , alors le complémentaire qui est $(1 - f)$ de la demande doit être satisfait par le système éolien.

Les valeurs limites de f correspondent à des systèmes purs. En effet, $f = 1$ correspond à une utilisation de 100 % du PV et $f = 0$ représente 100 % d'utilisation du système éolien. Donc les équations (1) et (2) deviennent :

$$S_{pv} e_{pv} = f Q_d \quad (3)$$

$$S_e e_e = (1 - f) Q_d \quad (4)$$

avec $e_{pv} = S_{pv} H R_{pv}$ et $e_e = 0.6125 C_p S_e V^3$

où :

- H : Irradiation solaire
 R_{pv} : Rendement des panneaux photovoltaïques
V : Vitesse du vent
 C_p : Facteur de conversion (coefficient de puissance d'après Betz $C_p = 0,595$)

Deux scénarios sont considérés ici qui sont basés respectivement sur les moyennes annuelles pour chaque mois et des moyennes du mois le plus défavorable [9].

3.4 Scénario 1 (s = 1), les moyennes annuelles pour chaque mois

Dans cette méthode, nous avons déterminé les surfaces des panneaux photovoltaïques et de l'aérogénérateur à partir des valeurs moyennes annuelles calculées à partir des valeurs mensuelles, qu'on note \bar{e}_{pv} et \bar{e}_e . La charge est notée \bar{Q}_d et les surfaces des composantes solaire et éolienne sont données par les équations suivantes :

$$S_{pv}^{s=1} = f \frac{\bar{Q}_d}{\bar{e}_{pv}} \quad (5a)$$

$$S_e^{s=1} = (1 - f) \frac{\bar{Q}_d}{\bar{e}_e} \quad (5b)$$

En pratique, ce scénario est utilisé lorsqu'on ne dispose que des données moyennes climatiques annuelles.

3.5 Scénario 2 (s = 2), la méthode du mois le plus défavorable

Dans cette méthode, on détermine les surfaces en respectant le mois le plus défavorable pour le solaire et pour l'éolien.

La surface requise pour les composantes renouvelables est donnée par :

$$S_{pv}^{s=2} = f \text{Max} \left| \left(\frac{Q_d}{e_{pv}} \right) \right| \quad (6a)$$

$$S_e^{s=2} = (1 - f) \text{Max} \left| \left(\frac{Q_d}{e_e} \right) \right| \quad (6b)$$

Ce scénario est utilisé lorsqu'on dispose d'une base de données mensuelles du site considéré.

3.6 Les surfaces retenues des composantes renouvelables

La composante retenue de la surface $S_{i,a}$ ($i = 1$ pour le PV et $i = 2$ pour l'éolien) est particulièrement essentielle pour les systèmes de petite échelle économique. Ceci est pris en compte en introduisant la surface de l'unité de composante $S_{i,u}$ ($S_{pv,u} = 0.3 \text{ m}^2$ et $S_{e,u} = 0.65 \text{ m}^2$). La surface retenue est calculée à partir de l'équation suivante :

$$S_{i,u}^s = Cte S_{i,u} \quad (7)$$

avec C_{te} est une constante donnée par le nombre entier voisin à degré élevé du rapport $S_i^s / S_{i,s}$, s représente le scénario.

3.7 Coefficient d'autonomie R

Le coefficient d'autonomie R du système est calculé à partir du rapport du nombre total des jours où on a le déficit au nombre total des jours de l'opération.

$$R = 1 - \frac{NJD}{\text{Nbre total}} \quad (8)$$

Pour une opération annuelle, le nombre total est égal à 365 jours.

Dans le système de mesure et d'optimisation, le critère d'autonomie est $R \geq R_{\min}$, avec R_{\min} la fraction minimale du temps alloué pour lequel le système doit couvrir la demande.

3.8 Capacité du système de stockage

La consommation demandée maximale $Q_{d,\max} = 10$ kWh, est utilisée pour calculer la capacité des batteries de stockage. La capacité des batteries (en Ah) pour une période de temps Δt par jour est donnée par l'équation suivante :

$$C_{b_{bat}} = \frac{Q_{d,\max} 1000}{V_{sys}} \frac{\Delta t}{N_m} \quad (9)$$

avec V_{sys} est la tension nominale du système et N_m est le nombre de jours du mois le plus défavorable. La période Δt est définie par le concepteur, par rapport à l'autonomie demandée.

Avec les composantes renouvelables, la capacité actuelle des batteries est choisie en introduisant la taille unité de la capacité $C_{b_{bat,u}}$. La capacité actuelle est donnée par l'équation suivante :

$$C_{b_{bat}} = C^{te} C_{b_{bat,u}} \quad (10)$$

avec C^{te} qui est une constante donnée par la partie entière du rapport $(C_{b_{bat}} / C_{b_{bat,u}})$.

3.9 Analyse économique du système

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer le triplet optimal (f , S_{pv} , S_e) qui correspond à un bon fonctionnement du système avec un coût minimal. C'est pour cela que nous avons évalué le coût de chaque configuration (f , S_{pv} , S_e). Une telle analyse nécessite des données précises sur le prix des différents éléments du système.

Pour simplifier, seulement les coûts capitaux des composantes C_i sont considérés dans cette étude (on n'a pas tenu compte du coût des câbles et les autres accessoires). Le coût total du système est donné par la relation suivante :

$$C_{tot} = C_{pv} + C_e + C_{ba} \quad (11)$$

Les prix des paramètres que nous avons utilisés dans cette optimisation sont groupés dans le tableau ci-après :

Tableau 1: Coût des équipements utilisés

Module PV en Si amorphe (DH/m ²)	Aérogénérateur (DH/m ²)	Batterie (DH/Ah)
4200	8000	30

4. SIMULATION

4.1 Procédure

La procédure d'optimisation et de mesure que nous avons représentée est divisée en deux étapes.

Premièrement, nous avons déterminé la configuration économique optimale de la composante renouvelable, sans tenir compte de la capacité des batteries. Nous avons varié la fraction f d'un pas de 0.1 ($0 \leq f \leq 1$) et pour chaque valeur de f la surface des composantes renouvelables est calculée, respectivement à partir des équations (5a, 5b) et (6a, 6b), en utilisant les deux scénarios (1 et 2). Puis, nous avons déterminé la surface retenue à partir de l'équation (7). En tenant compte des coûts des composantes renouvelables, nous avons déterminé le triplet optimal (f, A_{pv}, A_e).

Dans un deuxième temps, nous avons calculé la capacité des batteries à partir des équations (9) et (10), pour une période déterminée Δt . La simulation que nous avons utilisée par la suite est basée sur une analyse jour par jour de l'énergie $S(j)$ contenue dans les batteries. $S(j)$ dépend de l'état de charge de la veille ($S(j-1)$), de l'énergie des composantes renouvelables ($e_{pv} + e_e$) et de la consommation assurée par le système de stockage (Q_d / R_{bat}), où R_{bat} est le rendement des batteries.

Dans notre programme (Fig. 3), nous avons simulé le rôle du régulateur par des tests sur la quantité d'énergie $S(j)$ stockée dans les batteries. Si $S(j)$ est inférieure à 20 % de la capacité des batteries, cela signifie que la demande n'est pas entièrement satisfaite durant cette journée, le jour j est alors compté comme jour de déficit. A partir de ces journées déficitaires, nous avons calculé le coefficient d'autonomie R .

4.1 Résultats

Les résultats de simulation pour le scénario 1 sont représentés dans les figures 4 et 5.

Nous remarquons que, la configuration la plus économique du système avec le scénario 1 est un système éolien pur, $f_{s=1}^{opt} = 0$, couvrant une charge de $\bar{Q}_d = 10 \text{ kWh}$. On constate aussi que pour la même demande, le système hybride le plus économique est pour $f_{s=1} = 0.1$ avec un coût de 19 220 DH.

Les résultats de l'optimisation du système avec le scénario 2 sont résumés dans les figures 6 et 7.

On constate d'après les figures 6 et 7, que le scénario 2 nous donne une installation coûteuse. La configuration la plus économique du système, en utilisant le scénario 2, est pour $f_{s=2}^{opt} = 0$, indiquant aussi un système éolien simple. Le système hybride le plus économique est pour $f_{s=2} = 0.1$, avec un coût de 50 560 DH.

A partir de ces résultats, on constate qu'il y a une tendance économique favorable pour l'usage de l'éolien sur le photovoltaïque, parce que l'énergie éolienne domine largement l'énergie solaire pour le site de Dakhla.

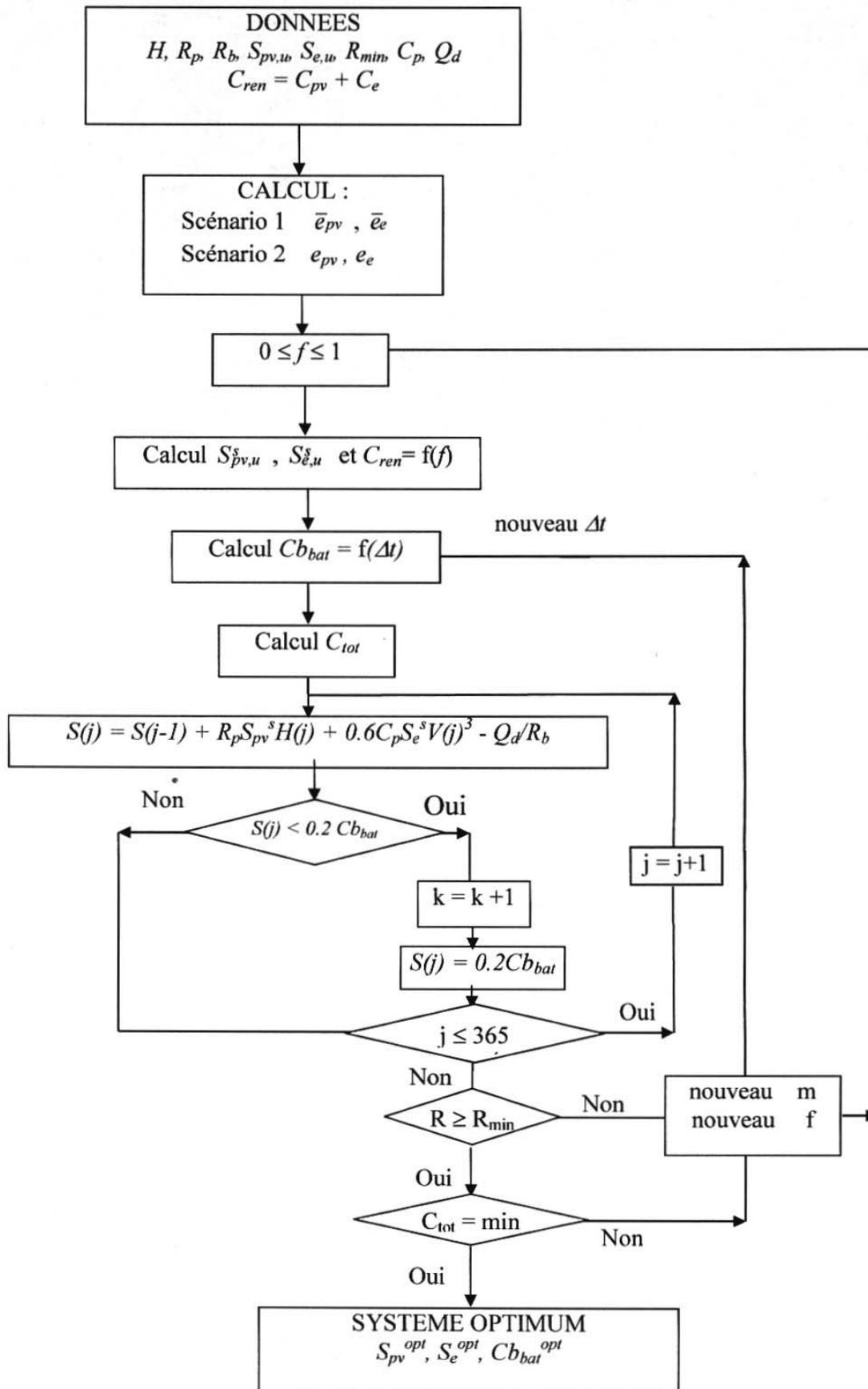


Fig. 3: Organigramme de simulation du système hybride

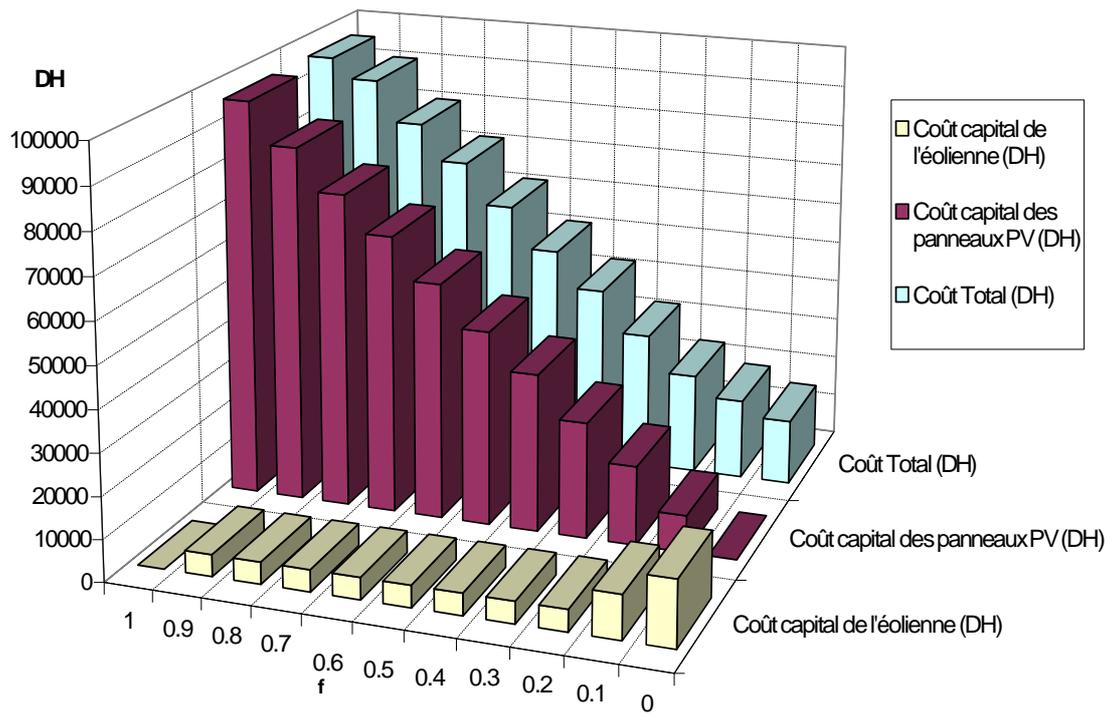


Fig. 4: Coûts des panneaux PV et de l'éolienne pour le scénario 1

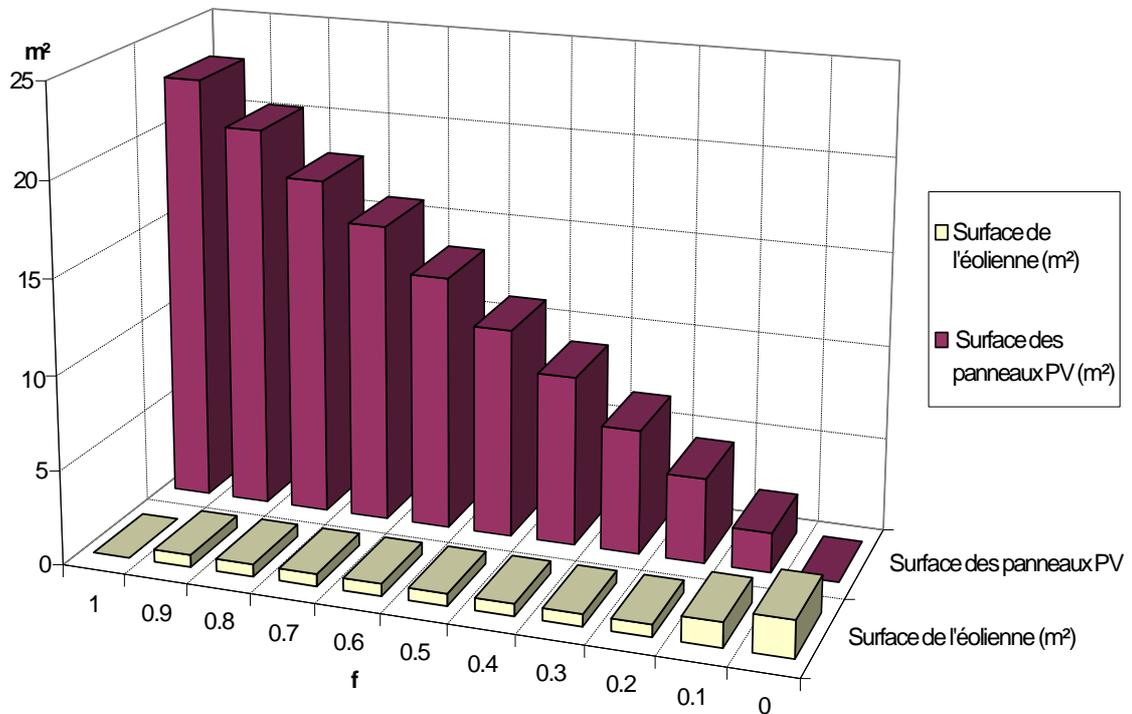


Fig. 5: Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne pour le scénario 1

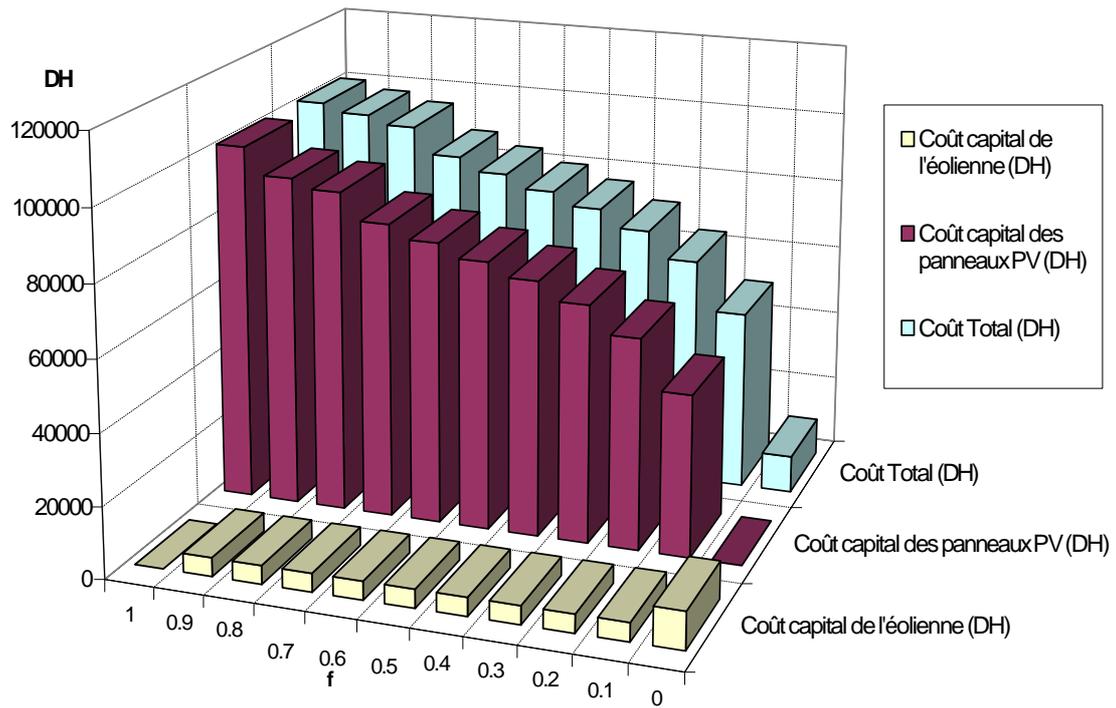


Fig. 6: Coûts des panneaux PV et de l'éolienne pour le scénario 2

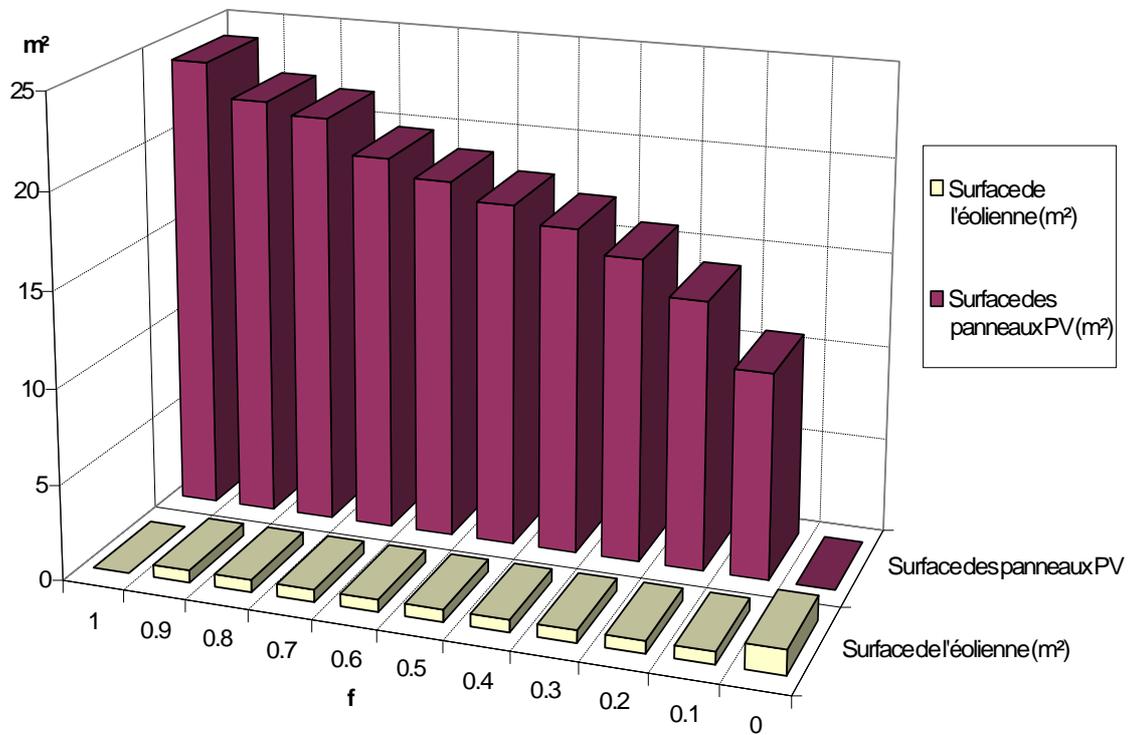


Fig. 7: Surfaces des panneaux PV et de l'éolienne pour le scénario 2

5. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimale basée sur les résultats d'une simulation utilisant une année de référence de la vitesse du vent et une autre de l'irradiation solaire globale journalière pour le site de Dakhla.

Nous avons examiné deux scénarios afin d'illustrer l'autonomie relative à l'énergie photovoltaïque et à l'énergie éolienne pour le système hybride. Le premier scénario utilise la moyenne des valeurs mensuelles par an, alors que, le deuxième scénario introduit la notion du mois le plus défavorable.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un système photovoltaïque comme système d'appoint avec un système éolien augmente le coût du système hybride pour le site de Dakhla.

REFERENCES

- [1] N.H. Lipman, "Overview of Wind/Diesel Systems", Renewable Energy, Vol. 5, Part I, pp. 595-617, 1994.
- [2] A.D. Bagul, Z.M. Salameh and B. Borowy, "Sizing of a Stand-Alone Hybrid Wind-Photovoltaic System Using a Three-Event Probability Density Approximation", Solar Energy, Vol. 56, N°4, pp. 323-335, 1996.
- [3] T. Markvart, "Sizing of Hybrid Photovoltaic-Wind Energy Systems", Solar Energy, Vol. 57, N°4, pp. 277-281, 1996.
- [4] H. Gabler and J. Luther, "Wind-Solar Hybrid Electrical Supply Systems, Results from a Simulation Modal and Optimization with Respect to Energy Pay Back Time", Solar & Wind Technology, Vol. 5, N° 3, pp. 239-247, 1988.
- [5] J.F. Manwell, W.A. Stein et al., "An Investigation of Variable Speed Operation of Diesel Generators in Hybrid Energy Systems", Renewable Energy, Vol. 2, N°6, pp. 563-571, 1992.
- [6] P. Lundsager and H. Bindner, "A Simple, Robust & Reliable Wind Diesel Concept for Remote Power Supply", Renewable Energy, Vol. 5, part I, pp. 626-630, 1994.
- [7] H.G. Beyer and C. Langer, "A Method for the Identification of Configurations of PV/Wind Hybrid Systems for the Reliable Supply of Small Loads", Solar Energy, Vol. 57, pp. 381-391, 1996.
- [8] M. Egido and E. Lorenzo, "The Sizing of Stand-Alone PV-Systems : A Review and a Proposed New Method", Solar Energy Materials & Solar Cells, 26, pp. 51-69, 1992.
- [9] C. Protogeropoulos, B.J. Brinkworth and R.H. Marshall, "Sizing and Techno-Economical Optimization for Hybrid Solar Photovoltaic/Wind Power Systems with Battery Storage", Int. J. Energy Res., Vol. 21, pp. 465-479, 1997.
- [10] A. El Khadimi, "Modélisation de l'Irradiation Solaire Globale d'un Plan Horizontal et de la Vitesse du Vent en Vue de leur Utilisation dans le Dimensionnement d'un Système Hybride", Thèse de Doctorat de 3^{ème} Cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, 1998.
- [11] Ministère de l'Energie et des Mines, "L'Energie Eolienne au Maroc, Gisement - Dimensionnement", C.D.E.R, Royaume du Maroc, 1986.
- [12] B. Fortunato, G. Mummolo and G. Cavallera, "Economic Optimisation of a Wind Power Plant for Isolated Locations", Solar Energy, Vol. 60, N°6, pp. 347-358, 1997.