



Réactualisation de l'Évaluation du Gisement Solaire et Analyse de sa Complémentarité avec l'Énergie Éolienne en Algérie

Z. BOUZID*, M. DEBBAB, M. BELAOU, N. GHILLAI

Unité de Recherche en Matériaux et Energies Renouvelables (URMER), Université de Tlemcen, ALGERIE

* Auteur correspondant : bzd.zakaria@gmail.com

Résumé — Les énergies renouvelables sont plus respectueuses envers la nature. En plus, elles sont inépuisables à l'échelle humaine, ce qui n'est pas le cas des énergies fossiles. En Algérie, l'énergie solaire est parmi les sources renouvelables les plus prometteuses (une moyenne de 3000 heures d'ensoleillement par an), suivie par l'énergie éolienne. Leur exploitation apparaît comme une solution idéale aux problèmes environnementaux causés par la surexploitation des sources fossiles. Dans ce contexte, nous avons décidé de contribuer à la réactualisation du gisement solaire algérien. Ensuite, en exploitant les résultats obtenus, nous passons à l'analyse de l'intensité de la relation qui peut exister entre les variations temporelles des deux sources (soleil et vent) et nous finissons par une analyse de la complémentarité énergétique entre eux.

Mots clés — Algérie, énergie solaire, énergie éolienne, complémentarité temporelle, complémentarité énergétique

I. INTRODUCTION

La hausse brutale connue au niveau du prix du pétrole dans les années 70 a poussé pour la première fois l'homme à s'intéresser à d'autres sources d'énergie. En Algérie, même si les opinions diffèrent quand il s'agit de se mettre d'accord sur une date précise, l'ensemble des experts du domaine sont d'accord pour dire qu'il viendra le jour où l'épuisement des gisements de sources fossiles sera inévitable [1].

Une des réponses à ce problème est l'utilisation des énergies dites renouvelables. Ces dernières, en plus d'être plus respectueuses envers la nature, sont aussi connues pour être inépuisables suivant l'échelle humaine de temps.

En Algérie, dans le secteur des énergies renouvelables, le solaire occupe la première place. En effet, de nombreuses études ont montré que le potentiel en énergie solaire de ce pays est l'un des plus importants au monde. Cependant, il existe aussi une autre source renouvelable très prometteuse qui n'est d'autre que l'énergie éolienne. Les premiers travaux publiés par Said et al en 1984 [2], Bensaad en 1985 [3], Hammouche en 1990 [4], Kasbadji Merzouk en 2000 [5], et Sidi Mohamed Boudia en 2011 [6], montrent que l'Algérie a un gisement éolien assez appréciable, son exploitation s'avère intéressante.

L'utilisation de ces deux sources apparaît comme étant la solution miraculeuse aux problèmes causés par la surexploitation des réserves fossiles, mais le caractère intermittent de leur disponibilité est souvent un frein empêchant leur utilisation, particulièrement sur sites isolés telle que si la quantité d'une des sources s'affaiblissait, des coupures au niveau de la production d'électricité peuvent survenir. Afin de régler ce problème, le concept de système « hybride » fut introduit, couplant au sein d'un même système, deux dispositifs utilisant chacun une des deux sources. Ceci permet de combler le déficit de l'une, quand il se produit, par l'abondance de l'autre.

Dans ce contexte, nous avons décidé dans notre travail de contribuer à la réactualisation du gisement solaire algérien, ensuite en exploitant les données obtenues, nous allons analyser les complémentarités temporelle et énergétique pour plusieurs régions en Algérie, afin d'identifier des sites où l'installation de systèmes hybrides solaire/éolien serait intéressante.

II. REACTUALISATION DU GISEMENT SOLAIRE ALGERIEN

A. Contexte

Le gisement solaire peut être défini comme la quantité de rayonnement solaire reçue par une surface pour une certaine période de temps. L'Algérie, avec une moyenne de 3000 heures d'ensoleillement par an [1], est le pays qui dispose du plus important gisement solaire de tout le bassin méditerranéen.

De nombreuses études ont permis d'analyser et de quantifier le gisement solaire dont dispose ce pays, le plus célèbre d'entre eux est sûrement l'Atlas Solaire d'Algérie publié par l'office algérienne des publications universitaires en 1987 [7].

Sur le site du ministère de l'énergie et des mines de l'Algérie [8], nous pouvons trouver des cartes montrant des évaluations préliminaires (1998 – 1999) du rayonnement reçu sur surfaces horizontale et normale. Au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) d'Alger, le premier Atlas d'une série consacrée à l'évaluation des gisements des sources renouvelables en Algérie fut publié en 2013. Ce premier volume, basé sur le travail de Yaich et al [9], est dédié au gisement solaire [10] et compte une étude sur 48 sites répartis



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



à travers le territoire du pays. Les données utilisées proviennent de stations météorologiques.

B. Problématique

Dans notre travail, afin de contribuer à la réactualisation de l'évaluation du gisement solaire algérien, les données de rayonnement solaire sont nécessaires. Le type de donnée le plus simple à obtenir est le rayonnement global sur surface horizontale. Ainsi, nous pouvons utiliser les mesures faites au niveau des stations météorologiques. Cependant, aucune base de données contenant ces mesures n'est librement et facilement disponible, et même quand on en trouve, d'autres problèmes se posent :

- Le nombre de régions couvertes est limité (particulièrement dans le Sud).
- Le nombre de données est limité.
- Le format et la fréquence temporelle ne sont pas toujours adéquats pour l'utilisation qu'on veut en faire.

C. Solution, méthodologie et résultats

En faisant face aux problèmes que nous venons de citer, nous avons décidé de :

- Chercher des bases facilement accessibles et exploitables contenant les données nécessaires pour notre travail.
- Développer un outil capable de récupérer ces données et de les traiter numériquement.
- Dessiner des cartes permettant d'apprécier et d'analyser le gisement solaire algérien.

Grace au programme de recherche en Sciences de la Terre de la NASA, qui supporte les systèmes satellitaires fournissant d'importantes mesures pour la recherche, l'étude et l'analyse des processus climatiques, nous avons été en mesure d'obtenir les valeurs du rayonnement solaire quotidien sur surface horizontale. Ces valeurs, issues du portail web « Surface meteorology and Solar Energy » (SSE) [12], et couvrant plusieurs années, ont été automatiquement téléchargées et traitées grâce à un script que nous avons développé avec le langage Bash [13].

Les cartes de gisement solaire ont été dessinées pour chaque mois de l'année (figure 1). En les analysant, nous remarquons que :

- Le gisement solaire à travers le pays tend à croître de janvier jusqu'à juillet où il atteint son maximum. À partir de Août, il commence à faiblir jusqu'à la fin d'année.

- Le gisement solaire est plus important dans le Sud algérien. Plus nous avançons vers le Nord, plus il faiblit.
- En décembre, c'est approximativement entre les latitudes 32° et 37° Nord, et longitudes 1° et 9° Est, que le gisement solaire du Nord est le plus important. En avançant vers les mois chauds, nous relevons que cette surface rétrécit et se redistribue en plusieurs petites surfaces ayant des gisements plus ou moins différents mais qui restent plus importants que le gisement qui règne dans cette partie du pays durant la fin d'année.
- Toujours en restant dans le Nord, nous remarquons que les gisements qui se trouve à l'extrême Est est le plus faible du pays.
- Dans le Sud, où le rayonnement solaire reçu est le plus important, c'est à l'extrême Sud-Est que nous retrouvons le gisement le plus important du pays. Cependant, durant les mois chauds (comme il apparaît clairement durant le mois de juillet), c'est entre les latitudes 26° et 30° Nord, et longitudes 1° et 10° Est, que le pays reçoit le plus d'énergie solaire. Ce n'est pas une coïncidence si c'est l'intérieur de ce périmètre que la première centrale thermique hybride d'Algérie a été installée (Hassi R'Mel, 31.7° Nord et 6.05° Est).

III. COMPLEMENTARITE DES SOURCES SOLAIRE ET EOLIENNE

A. Sites sélectionnés et données récupérées

Afin d'étudier les complémentarités temporelle et énergétique entre les deux sources (solaire et éolien), et ce pour vingt régions réparties un peu partout à travers le pays (figure 2, tableau 1), nous avons besoin de collecter les données suivantes :

- Le rayonnement journalier global H sur surface horizontale.
- La vitesse journalière v du vent à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol.

Les vitesses du vent pour les vingt régions ont été récupérées à partir des archives de la « National Climatic Data Center » [14]. Les valeurs journalières n'étaient pas disponibles, donc nous avons utilisé des valeurs horaires. Ainsi, en exploitant ces dernières, nous avons calculé et reconstruit les données des vitesses du vent sur une base quotidienne pour chaque région.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2016

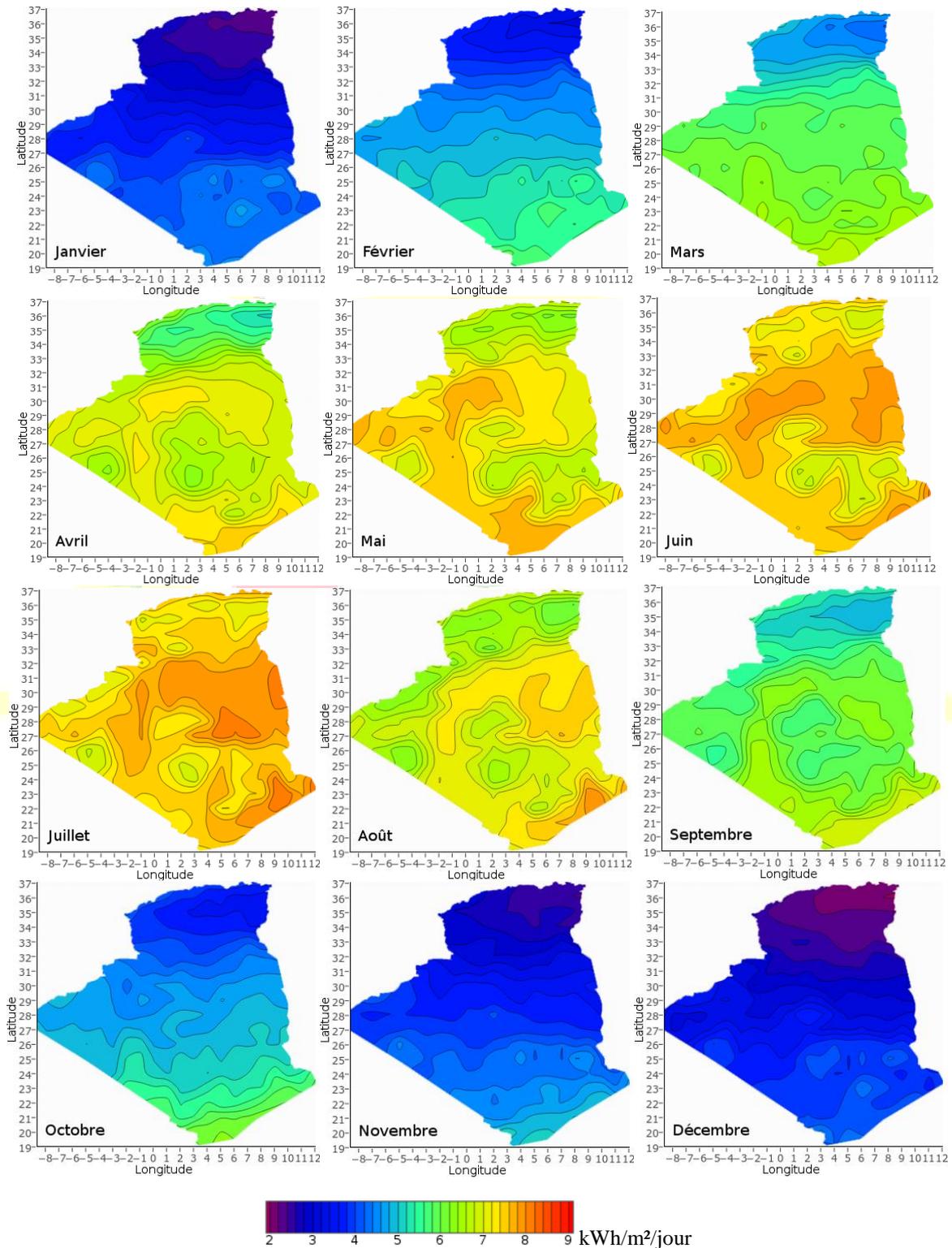


Fig. 1 Cartes mensuelles du gisement solaire algérien



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



Fig. 2 Localisations des 20 sites étudiés

TABLE I
COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DES SITES SELECTIONNES

Site	Id	Latitude (°N)	Longitude (°E)
Annaba	DABB	36.82	7.80
Batna	DABT	35.55	6.18
Bechar	DAOR	31.64	-2.26
Tebessa	DABS	35.43	8.12
Chlef	DAOI	36.21	1.33
ElGolea	DAUE	30.57	2.85
EsSenia	DAOO	35.62	-0.62
Mascara	DAOV	35.20	0.14
Illizi	DAAP	26.72	8.62
InAmenas	DAUZ	28.05	9.64
Jijel	DAAV	36.79	5.87
Laghouat	DAUL	33.76	2.92
Soummam	DAAE	36.71	5.06
Djanet	DAAJ	24.29	9.45
Tindouf	DAOF	27.70	-8.16
Zenata	DAON	35.01	-1.45
Setif	DAAS	36.17	5.32
Gherdaia	DAUG	32.38	3.79
H.Messaoud	DAUH	31.67	6.14
Ouargla	DAUU	31.91	5.41

Pour les données solaires, nous avons collecté les valeurs du rayonnement global horizontal depuis le portail SSE. Il est à noter que des valeurs journalières d'un profil annuel typique obtenu à partir de données de 21 années ont été utilisées dans nos calculs. Pour les vitesses du vent, nous avons utilisé en moyenne de 15 années.

B. Calcul d'énergie

Nous considérons la quantité d'énergie solaire en W/m². Vu que les vitesses du vent sont exprimées en m/s, nous devons

préalablement convertir ces vitesses en énergie recouvrable par m² de surface balayée par les pales d'une éolienne :

$$E_{wind} = \frac{1}{2} \rho A \sum_i^{24} \bar{v}_i^3 \quad (1)$$

ρ est la densité standard de l'air et la valeur de la surface A est prise égale à 1 m².

Le rayonnement solaire est exprimé par unité de surface au sol. L'énergie récupérée à partir du vent est exprimée par unité de surface balayée dans l'air par les pales d'une éolienne. Toutefois, même si nous ne pouvons pas mettre ces deux énergies au même plan, une analyse des complémentarités qui existent entre elles est toujours possible.

C. Complémentarités temporelle et énergétique

Nous allons analyser l'intensité de la relation qui peut exister entre les variations temporelles des deux sources renouvelables d'énergie : solaire et éolien. Cette analyse se base sur le calcul du coefficient de corrélation de Pearson [15] :

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

x_i et y_i sont les valeurs journalières de l'énergie solaire et énergie éolienne, respectivement, pour le jour i , \bar{x} et \bar{y} sont des valeurs moyennes :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

Les valeurs possibles pour le coefficient r_{xy} peuvent se situer entre -1 et 1 :

- Si $r_{xy} = 0$, les séries de données ne sont pas corrélées.
- Si $r_{xy} = 1$, les deux séries de variables sont colinéaires et parallèles. Ceci veut dire qu'une série est une fonction croissante de l'autre.
- Si $r_{xy} = -1$, les deux séries de variables sont aussi colinéaires mais dans des directions opposées. Les valeurs d'une série sont une fonction décroissante de l'autre.

Dans notre étude, plus la valeur de r_{xy} est proche de 1, plus les quantités des deux sources varient dans la même direction, et plus sa valeur est proche de -1, plus les quantités des deux sources varient dans des directions opposées. Les résultats obtenus pour les 20 régions sont représentées sur la figure 3.

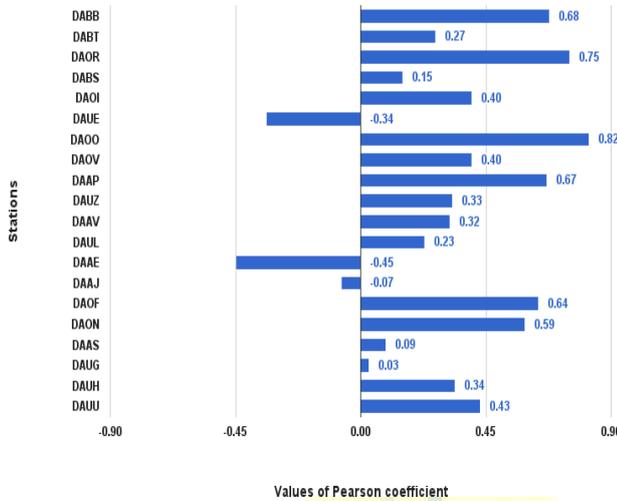


Fig. 3 Valeurs de r_{xy}

Nous allons utiliser un autre facteur pour analyser la relation qui existe entre l'énergie contenue dans le vent et celle du rayonnement solaire incident sur une surface horizontale pour une année complète (figure 4) :

$$r_e = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (5)$$

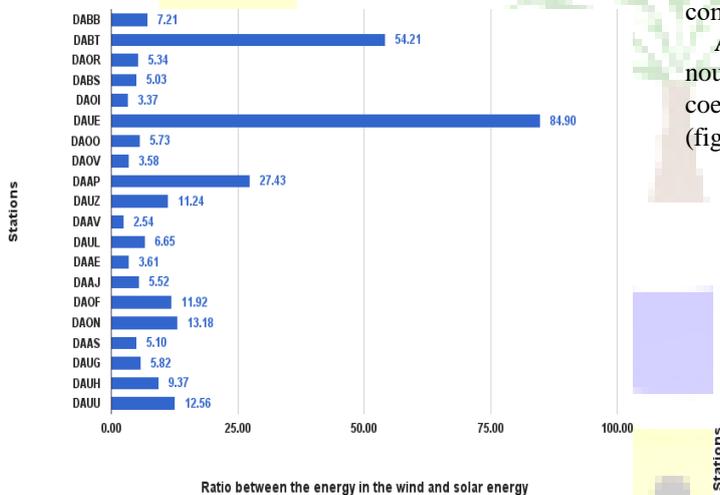


Fig. 4 Valeurs de r_e

À partir des résultats, nous notons que :

- Seulement trois des vingt sites étudiés possèdent des valeurs négatives pour le coefficient r_{xy} : El Golea (DAUE), Soummam (DAAE) et Tiska (DAAJ). Cela indique que les quantités des sources solaire et éolienne dans ces sites varient de manière opposée au cours du temps, excepté pour le dernier pour lequel la valeur du

coefficient de Pearson est presque égale à zéro (nous pouvons dire dans ce cas que les quantités des deux sources ne sont pas corrélées à travers le temps).

- La valeur négative maximale (valeur absolue) pour r_{xy} est -0.45 (Soummam).
- L'ensemble des 17 sites restants possèdent des valeurs positives de r_{xy} . Toutefois, nous notons que le maximum se situe dans la localité de Es Senia (DAOO), et que Setif (DAAS) et Gherdaïa (DAUG) possèdent des valeurs du coefficient de Pearson proches de zéro, ce qui indique que les quantités des deux sources renouvelables (solaire et vent) pour ces régions ne sont pas corrélées à travers le temps.
- La valeur maximale pour r_e a été trouvée dans la localité de El Golea (DAUE).

Un système hybride autonome photovoltaïque/éolien, par exemple, doit continuellement produire de l'électricité afin de satisfaire la demande de charge. Pour cela, une valeur du r_{xy} proche de -1 serait recommandée pour que l'absence d'une des deux sources d'énergie, quand elle se produit, soit comblée par l'abondance de l'autre. Cette condition est particulièrement importante lorsqu'aucun système de stockage d'énergie n'est intégré au système hybride. En plus, l'analyse de la complémentarité énergétique entre les sources est importante lorsqu'on installe ce type de système. Plus cette complémentarité est importante, plus les des sources se complètent afin de produire le plus d'énergie que possible.

Afin de coupler les analyses des deux complémentarités que nous venons de voir, nous allons introduire un nouveau coefficient r_p qui tient compte des valeurs de ces deux dernières (figure 5) :

$$r_p = r_{xy} \times r_e \quad (6)$$

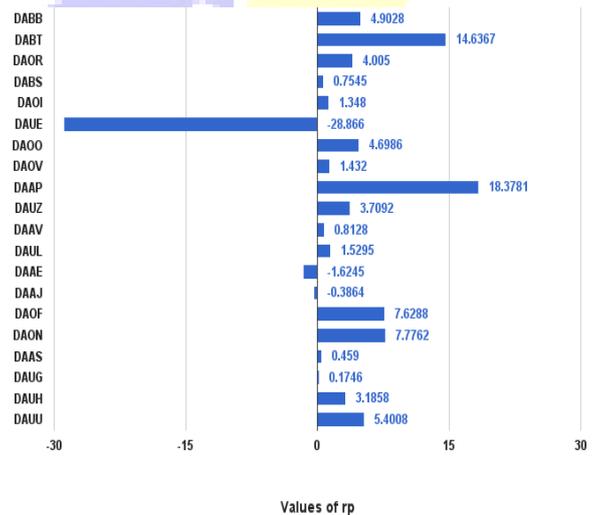


Fig. 5 Valeurs de r_p



IV. CONCLUSIONS

Notre présent travail consistait à analyser les complémentarités temporelle et énergétique entre deux sources renouvelables.

En utilisant les données journalières que nous avons collecté et calculé pour les vingt régions d'Algérie choisies, nous nous sommes basés sur le coefficient de Pearson r_{xy} afin d'analyser la complémentarité et la simultanéité temporelle entre l'énergie solaire et l'énergie puisée à partir du vent. Nous avons aussi utilisé le coefficient r_e pour analyser la complémentarité énergétique entre ces deux sources.

Pour un système hybride PV/éolien sans stockage, qui alimente directement la demande de charge, le coefficient de Pearson doit être négatif et proche de la valeur -1. La région de Soummam, avec $r_{xy} = -0.45$, est adaptée pour l'utilisation d'un système hybride sans stockage : quand la vitesse du vent n'est pas importante, l'énergie qui provient du soleil est plus significative, et quand cette dernière faiblit, la vitesse du vent devient plus importante et vice versa.

Si nous intégrons des batteries à notre système (stockage), la complémentarité temporelle cesse d'être un problème et son analyse n'est plus une nécessité. En effet, même si les deux sources sont faibles au même moment, leurs quantités ont surement été assez importantes dans le passé pour recharger les batteries et ainsi permettre à ces dernières de restituer l'énergie stockée quand il le faut. Dans notre étude, en plus de l'étude de la complémentarité temporelle, nous avons abordé la complémentarité énergétique. Ensuite, nous avons introduit le

paramètre r_p , plus sa valeur est négative, plus la région est approprié pour l'utilisation d'un système hybride sans stockage, et le contraire est vrai aussi (pour un système avec stockage, nous optons pour un r_p positif).

REFERENCES

- [1] NOOR, Quarterly magazine of Sonelgaz group, N°10, (2010)
- [2] IBRAHIM, Said MA. Energy in the Arab world. Energy, 1984, vol. 9, no 3, p. 217-238.
- [3] Bensaid, H. 1985. The Algerian programme on wind energy. Proceeding of WEAC, 21-27
- [4] HAMMOUCHE, R. Atlas vent de l'Algérie/ONM. Algiers: Office des publications Universitaires (OPU), 1990.
- [5] MERZOUK, N. Kasbadji. Wind energy potential of Algeria. Renewable energy, 2000, vol. 21, no 3, p. 553-562.
- [6] BOUDIA, Sidi Mohammed. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. 2013. Thèse de doctorat.
- [7] CAPDEROU, Michel. Atlas solaire de l'Algérie. Office des publications Universitaires, 1988
- [8] Algerian Ministry of Energy, web site: <http://www.energy.gov.dz/>
- [9] YAICHE, M. R., BOUHANIK, A., BEKKOUCHE, S. M. A., et al. Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration. Energy Conversion and Management, 2014, vol. 82, p. 114-123.
- [10] YAICHE, M. R., & BOUHANIK, A.. Atlas solaire algérien. Portail des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16.
- [11] CHEMS project, web site : <https://portail.cder.dz/spip.php?rubrique47>
- [12] Solar energy and Surface Meteorology (SSE), web site: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [13] Bash project, web site: <https://www.gnu.org/software/bash/>
- [14] Climate Data Online, web site : <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>
- [15] Wikipedia, the free encyclopedia, web site: <http://wikipedia.org>