



Analyse comparative des ressources solaires de sites de centrales solaires thermodynamiques

Hichem Farsi*

Laboratoire de Mécanique Energétique et Systèmes de Conversion, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), BP 32, EL Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 September 2020

Accepted 27 November 2020

Mots clés:

Site assessment,
Solaire thermodynamique,
CSP,
Ressources solaires,
DNI

Keywords:

Site assessment,
Concentrated Solar Power,
CSP,
Solar resources,
DNI

RESUME

Le présent article est une contribution à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation de sites pouvant accueillir une centrale électrique solaire thermique à concentration (CSP). En particulier l'évaluation des ressources solaires de plusieurs sites potentiels est étudiée avec attention. L'irradiation solaire normale directe (DNI), nécessaire au dimensionnement des centrales CSP, est estimée à partir d'outils issus des mesures du rayonnement au sol ainsi que des estimations provenant de données satellites. Enfin, la méthodologie est appliquée sur un cas d'étude (dans le contexte Algérien) où il est aussi question d'évaluer des outils du rayonnement solaire pouvant être utilisés dans le cadre de cette méthodologie.

ABSTRACT

In the present paper, we contribute to the site assessment methodology for concentrated solar thermal power plants (CSP). In particular, the solar resource assessment of several potential sites is carefully studied. The Direct Normal Irradiation (DNI), necessary for the sizing of CSP power plants, is estimated with solar radiation tools built from ground measurements as well as satellite data. The methodology is applied to a case study in Algeria. Finally, solar radiation tools that can be used within the framework of this methodology are evaluated.

* Corresponding author, E-mail address: hfarsi@usthb.dz

Tél. : +213 7 98 81 32 40

ISSN: 1112-2242 / EISSN: 2716-8247



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Based on a work at <http://revue.cder.dz>.

1. Introduction

Le monde connaît actuellement une augmentation conséquente et continue de la demande en énergie [1]. La sécurité d'approvisionnement énergétique est de ce fait un enjeu majeur et crucial pour les pouvoirs publics. L'approvisionnement en énergie pour la plupart des pays provient essentiellement de ressources énergétiques fossiles. Ces dernières sont épuisables et émettent de grandes quantités de gaz à effet de serre participant ainsi à l'aggravation du phénomène global de réchauffement climatique. Le mix énergétique actuel n'est donc pas durable. Ceci a stimulé depuis quelques décennies la recherche et le développement de ressources énergétiques propres et renouvelables. L'utilisation de l'énergie solaire thermique est largement répandue dans le monde. Il s'agit de la transformation du rayonnement solaire en chaleur. Le solaire thermique à haute température est une filière prometteuse [2]. Appelé aussi solaire thermique à concentration (Concentrating Solar Power - CSP), il s'agit de l'utilisation d'un champ solaire formé de miroirs géants qui concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur afin de chauffer un fluide caloporteur à de hautes températures (jusqu'à 1 000 °C). Pour l'application "génération d'électricité" qui nous intéresse dans le cadre de cet article, le champ solaire est couplé à un bloc de puissance dans lequel l'électricité est produite de manière conventionnelle.

La rentabilité d'un projet de centrale de production d'électricité d'origine CSP (que nous appellerons par la suite de manière abrégée centrale CSP) est fortement liée à la sélection d'un site adéquat où la centrale sera érigée [3]. Cette sélection, communément appelée en anglais « site selection » ou « site assessment » est basée sur un ensemble de critères qui permettent l'identification du site en question suite à l'évaluation de plusieurs sites potentiels [4]. Les principaux critères sont : les ressources solaires, les ressources foncières (disponibilité de terrains plats et de grande superficie) et l'existence d'infrastructures (réseaux d'électricité, de gaz, d'eau, routes, ...) à proximité du site. Il y a lieu donc de réaliser la démarche d'identification du site le plus approprié pour une centrale CSP sur la base d'une méthodologie multicritères bien établie. Dans cet article, nous nous intéressons particulièrement au volet de la méthodologie traitant de l'évaluation des ressources solaires. En effet, le gisement solaire représente le critère le plus important dans l'optique de construire une centrale CSP présentant un coût économique viable.

Notre principale contribution dans cet article porte sur le fait qu'en phase amont (ou de développement) d'un projet d'implémentation d'une centrale CSP, on ne dispose pas de mesures au sol au niveau des sites potentiels. Installer ces instruments de mesure nécessite des

moyens, une rigueur dans l'exploitation des stations de mesure et surtout du temps (au minimum 1 année de mesures). L'idée, à ce stade du projet, est de recourir uniquement aux bases de données satellitaires qui présentent une précision moindre par rapport aux mesures au sol. Néanmoins, elles couvrent des plages temporelles beaucoup plus larges (plusieurs années à plusieurs dizaines d'années). On s'affranchit ainsi des mesures au sol et on vise à compenser partiellement cela en combinant l'utilisation de plusieurs bases de données satellitaires de bonne qualité. Le challenge consiste à comparer les données de ces outils qui sont souvent assez différentes, afin d'aboutir à une sorte de « moyenne représentative » que l'on pourra utiliser pour pré dimensionner la centrale CSP à installer ; ce qui pourrait être suffisant à ce stade précoce du projet.

Dans la littérature scientifique, l'évaluation des sites adéquats pouvant accueillir des centrales CSP est principalement réalisée pour des centrales photovoltaïques [5]. Très peu d'études ont donc été menées dans le domaine du CSP. Les quelques études faites dans ce domaine se sont concentrées généralement sur la considération d'un site spécifique [6]. Beaucoup d'études ont utilisé le système d'information géographique ou GIS (Geographical Information System) pour construire une base de données contenant un nombre important de sites potentiels pouvant accueillir une centrale CSP. La 1^{ère} étude en question a été réalisée par Broesamle et al. [7] qui ont à cet effet utilisé conjointement des données satellitaires pour estimer le rayonnement solaire et le système GIS pour la construction des alternatives (ou sites) possibles. Ceci leur a permis d'identifier et de classer des sites à fort potentiel CSP en Afrique du nord. D'autres auteurs ont par ailleurs superposé des cartes correspondant aux différents critères. C'est le cas des études présentées par Azoumah et al. [8] et Ramdé et al. [9]. Azoumah et al. ont précisé que l'évaluation des sites potentiels pour centrales CSP est un exercice critique. Ils ont à cet effet proposé des lignes directrices pour la sélection de sites viables, et ce via la prise en compte des critères les plus importants permettant l'évaluation des sites potentiels. Pour illustrer ces lignes directrices, ils les ont appliquées à un cas d'étude, en l'occurrence le Burkina Faso. Les ressources solaires utilisées par les auteurs proviennent du service SoDA (Mines Paris Tech, 2009, France). Cette étude a révélé que les meilleurs sites étaient situés dans la région du Sahel en bordure du Sahara. Ramdé et al. ont proposé une carte issue d'un travail d'évaluation et de classement de sites potentiels pour centrales CSP dans une région plus vaste que le Burkina Faso (il s'agit des pays de l'ECOWA : Economic Community of West African States). Ils ont à cet effet superposé 3 cartes portant sur les ressources solaires (DNI), la pente du terrain et le réseau électrique. Les ressources solaires ont été récupérées auprès du « Climatological Solar Radiation (CSR) Model, du National

Renewable Energy Laboratory (NREL), USA ». Sánchez-Lozano et al. [10] ont proposé une méthodologie basée conjointement sur le système GIS et les méthodes d'analyse multicritères afin d'évaluer les meilleurs sites pouvant accueillir des centrales CSP dans la région côtière de Murcie en Espagne (4 457 km²). Le système GIS a permis de générer une base de données contenant un très grand nombre d'alternatives (32 906) tandis que la méthode d'analyse multicritère « Fuzzy TOPSIS » a été utilisée pour évaluer les critères de sélection des sites potentiels. La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) a été quant à elle utilisée pour évaluer les poids associés à ces critères. Enfin, la méthode d'analyse multicritère ELECTRE-TRI a été utilisée pour comparer entre eux les 9 meilleurs sites identifiés en vue de leur classement. Les auteurs ont abouti à la conclusion que 4.69 % de la superficie totale de la région de Murcie représentait d'excellents sites pouvant accueillir des centrales CSP. Merrouni et al. [11] ont analysé l'adéquation de la région orientale du Maroc (82 800 km²) pour accueillir des centrales CSP. Ils ont combiné l'utilisation du système GIS avec la méthode multicritère AHP afin d'évaluer les sites potentiels dans cette région. Les critères considérés portaient sur le DNI, la pente du terrain, les distances par rapport aux habitations, aux routes, aux chemins de fer et au réseau électrique, et enfin les distances par rapport aux ressources d'eau (cours d'eau, barrages, eau souterraine). Les cartes représentant les données liées à ces critères ont principalement été récupérées auprès des organisations gouvernementales. Le DNI étant le critère le plus important, une carte solaire satellitaire de grande qualité a été utilisée. La résolution spatiale est de 1 km x 1 km et la durée couverte est de 20 ans. Cette carte est issue du projet Solar-Med Atlas (HELIOCLIM 3). Il est à noter que les auteurs ont considéré deux types de refroidissements possibles du condenseur afin de tenir compte de la rareté des ressources en eau de la région : refroidissement humide et refroidissement sec. L'étude a débouché sur le fait que 5.5 à 11.7 % (respectivement pour un refroidissement sec et un refroidissement humide) de la superficie totale de la région sont hautement adaptées à l'accueil de centrales CSP. En regardant de près les articles scientifiques cités ci-dessus, nous relevons une différence notable entre notre étude et ces articles : dans notre étude nous nous intéressons à un nombre faible de sites potentiels à évaluer tandis que pour les articles en question, le nombre de sites est très élevé.

2. Critères d'évaluation des sites potentiels

Comme cela a été précisé précédemment, la méthodologie d'identification de sites repose sur plusieurs critères dont principalement : les ressources solaires, les ressources foncières et les infrastructures.

Les ressources solaires représentent un critère crucial dans la perspective d'évaluation des sites. Nous considérons pour les technologies CSP la composante directe normale du rayonnement solaire (Direct Normal Irradiation - DNI) (Fig 1.). Pour atteindre une rentabilité satisfaisante d'un projet de centrale CSP, il y a lieu de considérer les sites qui présentent des valeurs moyennes annuelles de DNI supérieures à un certain seuil : 1 900 kWh/m²/an est un seuil exigé et 2 100 kWh/m²/an est un seuil recommandé [4]. Certaines régions doivent être exclues en raison d'une forte valeur de l'hygrométrie de l'air ou d'une nébulosité fréquente.

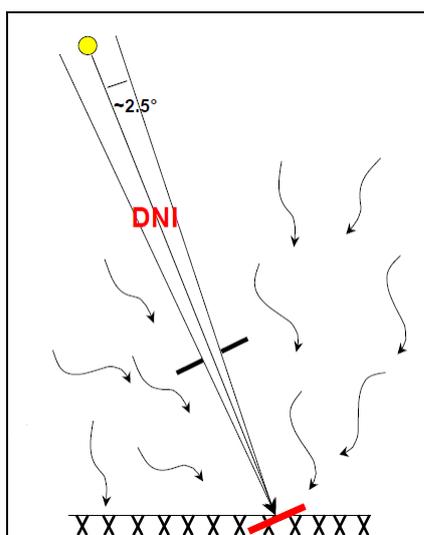


Fig 1. Schéma présentant le concept de DNI [12]

Les ressources foncières représentent un élément de grande importance pour le choix de sites. Un projet de centrale CSP nécessite beaucoup d'espaces (et qui de surcroit doivent être plats en ce qui concerne les technologies à focalisation linéaire) : des dizaines à des centaines d'hectares selon le niveau de puissance électrique à installer. A titre d'exemple : la superficie du terrain sur lequel est implantée une centrale CSP de 50 MW est d'environ 100 hectares [7]. Enfin concernant les infrastructures, il y a lieu de prendre en considération les réseaux d'électricité, de gaz et d'eau, les infrastructures de transport (routes, chemin de fer, aéroports, ...), les infrastructures de télécommunication, les réseaux de stations météorologiques ; bref tous les moyens ou infrastructures nécessaires pour une implantation et une exploitation optimales de la centrale. L'existence de réseau électrique adéquat à proximité de la centrale CSP est un critère majeur car elle permet de réduire considérablement les coûts d'investissement. Les centrales CSP de grandes puissances injectent de l'électricité au sein

d'un réseau électrique de haute tension qui transportera cette énergie vers les centres de consommation.

La méthodologie d'évaluation des ressources solaires représente comme cela a été précisé précédemment le volet le plus important de la méthodologie d'évaluation d'un site. Nous avons choisi dans cet article de nous focaliser uniquement sur le critère « Ressources solaires » ; les autres critères ne seront donc pas étudiés.

3. Méthodologie d'évaluation des ressources solaires

L'évaluation de la ressource solaire de sites potentiels est basée sur des données disponibles dans le temps et dans l'espace. L'intensité du rayonnement solaire qui atteint le sol va dépendre des atténuations que ce rayonnement va subir sur son trajet entre le soleil et le capteur solaire [13]. L'évaluation porte sur la collecte systématique de données d'ensoleillement spécifiques aux sites étudiés dans le but de déterminer avec une précision acceptable le dimensionnement du champ solaire ainsi que sa future production d'énergie thermique. La valeur moyenne annuelle du DNI peut varier jusqu'à 30 % d'une année sur l'autre. Les données devront donc être mesurées sur une période de 5 ou 10 ans. Ceci permet de réduire les erreurs d'estimation du DNI à long terme à respectivement moins de 10 et 5 %. Par ailleurs, la forte variabilité spatiale du DNI nécessite une résolution de moins de 5 km. Cette résolution spatiale descend à 1 km pour les zones côtières ou montagneuses [8].

Un projet de centrale CSP a recours à des données d'ensoleillement qui sont obtenues à partir de bases de données du rayonnement solaire accompagnées à chaque fois que cela est possible de mesures au sol. Il existe plusieurs bases de données du rayonnement solaire qui peuvent être classées en fonction de leurs sources et du mode de traitement des données. Certaines d'entre elles reposent sur les mesures au sol ; d'autres sont basées sur des données satellitaires. Il existe aussi des bases de données qui effectuent des interpolations spatiales à partir de mesure au sol et des données satellitaires. L'interpolation des données entre deux ou plusieurs stations de mesure au sol peut être réalisée lorsque les stations de mesure sont à proximité du site étudié. Elle permet de disposer de données plus précises que celles fournies uniquement par les satellites. Parmi les bases de données disponibles, nous citons : NASA SSE, METEONORM, HELIOCLIM, SOLEMI, SATEL-LIGHT.

Les mesures au sol (par pyréliomètre) peuvent être faites par le promoteur du projet CSP. Ces mesures sont prises au niveau du site lui-même et exigent une durée de mesure relativement longue (au-delà d'une année). Les mesures au sol présentent une très bonne

précision si elles sont réalisées avec soin. Cependant, le cas le plus courant est que nous ne disposons pas de stations de mesure au sol au niveau des sites étudiés où à leur proximité immédiate. Ces mesures sont en outre coûteuses et les stations de mesure doivent être entretenues très régulièrement. Les mesures issues des satellites nécessitent des programmes de mesure plus importants et couvrent de vastes régions. Elles permettent en outre de comparer un nombre importants de sites. Ces mesures sont associées à des bases de données à long terme. Néanmoins, elles ne peuvent pas atteindre la précision des mesures au sol. Elles présentent cependant l'avantage, par rapport aux mesures au sol, de fournir des données sur une période beaucoup plus longue, et donc de lisser les variations interannuelles du DNI.

Les mesures satellitaires permettent de rendre compte du rayonnement solaire direct. Elles s'effectuent en deux étapes de calcul [13].

Dans une première étape, l'irradiation du ciel clair est calculée pour un endroit et une heure donnés. L'atmosphère est supposée être sans nuages et l'influence de l'absorption et de la diffusion des molécules d'air, d'ozone, de la vapeur d'eau et des aérosols sur le transfert radiatif est déterminée.

Dans une deuxième étape, un indice de nuage est dérivé à partir d'images Meteosat, ce qui permet d'obtenir des données de transmission des nuages et un indice de clarté. Ces paramètres sont utilisés pour déterminer finalement l'irradiation solaire directe.

1^{ère} étape du calcul :

L'irradiation normale directe de ciel clair $G_{d,n,clair}$ est obtenue par application de différents facteurs de transmission pour le rayonnement au-dessus de l'atmosphère (qui est influencé par la constante solaire $G_{c,s}$). Ces facteurs de transmission correspondent à des processus d'atténuation du rayonnement atmosphérique : diffusion de Rayleigh « τ_r », « τ_o » relatif à l'absorption par l'ozone, « τ_g » relatif à l'absorption par les gaz uniformément mixtes (N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , ...), « τ_e » relatif à l'absorption par la vapeur d'eau et enfin « τ_a » relatif à l'absorption et à la diffusion par les particules d'aérosols. Ceci nous permet d'écrire [13] :

$$G_{d,n,clair} = G_{c,s} \cdot \tau_r \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_e \cdot \tau_a \quad (1)$$

Afin de déterminer ces facteurs de transmission, des informations sur la distribution de l'ozone, la vapeur d'eau et le contenu de l'aérosol dans l'atmosphère sont nécessaires.

2^{ème} étape du calcul :

Cette étape traite de la nébulosité. Les nuages ont la plus grande influence sur le transfert radiatif de l'atmosphère, de sorte qu'il est très important d'avoir des données fiables sur la nébulosité à un endroit donné. Ces données sont obtenues à partir des images Meteosat, à savoir des images acquises par les satellites météorologiques géostationnaires. Par le biais de ces images, différentes valeurs de l'albédo ρ à un certain point géographique et à des moments différents peuvent être enregistrés. Les différences dans l'albédo observées sont corrélées avec différentes couvertures nuageuses, car l'albédo vu du satellite est plus élevé pour les conditions de ciel couvert que pour les conditions de ciel clair. L'albédo enregistré, qui sera compris entre la valeur la plus élevée pour le ciel complètement couvert et la plus petite valeur pour le ciel complètement clair, est une mesure de la nébulosité à un endroit donné et à un moment donné. Le ρ_{max} (albédo maximale) n'a pas besoin d'être identifié individuellement à chaque site, car il ne dépend pas de l'état du sol. Il dépend exclusivement de l'angle d'incidence. L'albédo de réflectance réelle à un endroit donné et à un temps donné doit être compris entre la réflectance (albédo du sol) ρ_{min} et ρ_{max} . L'indice de nuage N indique la valeur de ρ par rapport à ρ_{min} et ρ_{max} . Elle est définie comme suit [13] :

$$N = \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (2)$$

$N = 0$ pour le ciel clair ($\rho = \rho_{min}$) et $N = 1$ pour le ciel nuageux ($\rho = \rho_{max}$).

Afin de calculer le rayonnement solaire direct, la transmission de nuage effective σ est introduite comme le rapport de l'irradiation directe réelle à l'irradiation directe du ciel clair [13] :

$$G_{d,clair} = \sigma \cdot G_d \quad (3)$$

σ est relié à N selon la relation $\sigma = e^{-10 \cdot N}$.

4. Etude de cas : programme EMPOWER

EMPOWER (enable and motivate sustainable power) est un programme qui visait la promotion d'un marché de l'électricité solaire (CSP et Photovoltaïque). Il s'agit d'une initiative du programme des Nations-Unies pour l'environnement (UNEP) et du ministère allemand de la coopération économique et du développement (BMZ) qui a été réalisé en 2009-2010. Il

avait pour objectif la création de nouveaux marchés pour la génération de l'électricité solaire dans les pays émergents et en voie de développement. Le but du programme consistait à réduire le coût de l'électricité solaire en augmentant la demande de ce type d'énergie. L'approche d'EMPOWER portait sur une démarche d'appui aux agences nationales des pays sélectionnés pour identifier des sites pouvant accueillir des centrales solaires et évaluer l'adéquation de ces sites à de tels projets (en termes de performances techniques et de coûts), via des études de pré faisabilité. EMPOWER offrait aussi aux agences nationales des pays participant au programme des outils d'aide à la conduite d'études d'évaluation de sites [14].

Le volet Algérien du programme EMPOWER portait sur la filière CSP. Le projet a été mené en collaboration entre le bureau d'études allemand Lahmeyer International GmbH qui avait en charge la conduite de ce programme, et la société New Energy Algeria (NEAL), dont les actionnaires sont les opérateurs énergétiques publics Sonatrach et Sonelgaz ainsi que le groupe industriel privé SIM. Ce projet visait l'identification d'un site faisant partie de la région sud-ouest de l'Algérie (un périmètre qui va de la wilaya de Béchar à la wilaya de Naâma).

5. Résultats et discussions

La 1^{ère} étape de la méthodologie d'évaluation des ressources solaires consiste à récupérer la carte représentant la répartition spatiale du DNI dans le pays faisant l'objet de l'étude, i.e. l'Algérie. Une carte a été remise par Lahmeyer dans le cadre du programme EMPOWER (Fig 2.). Il pourrait aussi s'agir d'une carte représentant uniquement la région étudiée.

Par la suite, une dizaine de sites sont pré sélectionnés avec l'outil Google Earth. Ce choix initial contient en lui-même une certaine imprécision qui est néanmoins corrigée au fur et à mesure de l'avancement de l'étude. Les sites pré sélectionnés obéissent aux critères suivants : Terrain inoccupé, plat et de grande superficie, absence d'étendues d'eau, réseaux d'électricité et de gaz naturel à proximité des sites.

Les coordonnées géographiques de ces sites sont :

- Ain Ben Khelil (Latitude : 33.29°N, Longitude : 0.76°W, wilaya : Naâma)
- Ain Sefra (32.76°N / 0.59°W, Naâma)
- Ben Khelil (33.54° N / 0.50°W, Naâma),
- Centrale de Naâma (33.46°N / 0.33°W, Naâma)
- El Biod (33.77°N / 0.14°W, Naâma)

- Rekab Mta El Kasdir (34.18°N / 1.22°W, Naâma)
- Abadla (30.97°N / 2.76°W, Béchar)
- Béni Abbès (30.13°N / 2.17°W, Béchar)
- Kenadsa (31.56°N / 2.43°W, Béchar)
- Bougtob (34.04°N / 0.09°E, El Bayadh)

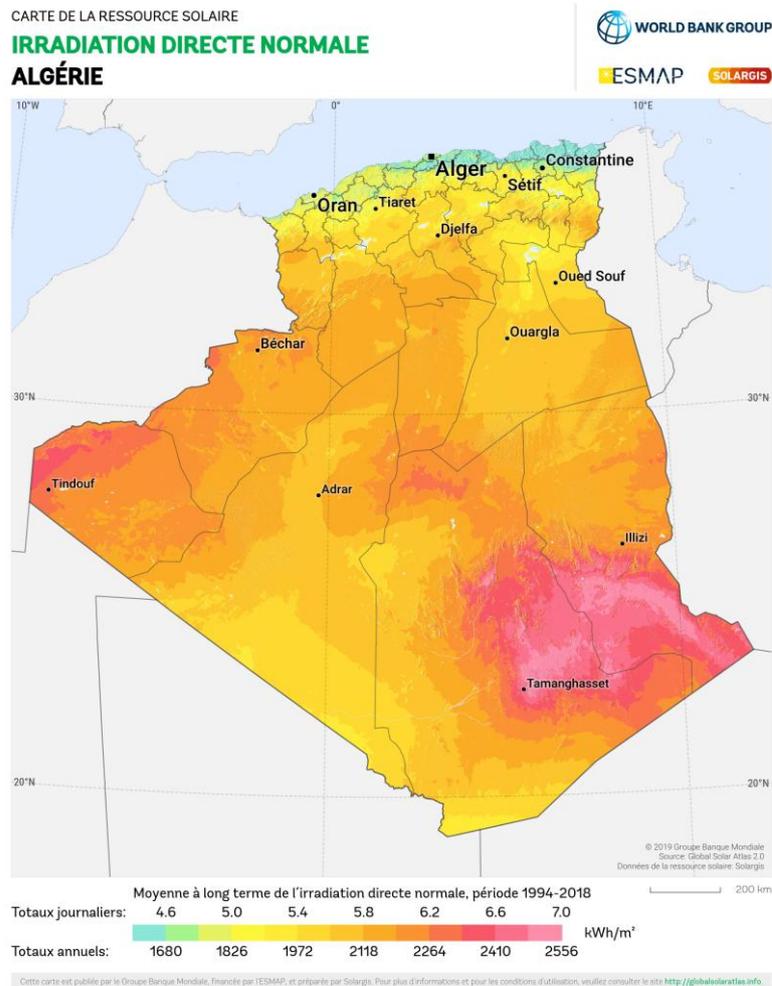


Fig 2. Carte solaire du DNI en Algérie [15]

La liste des sites présélectionnés a été établie par NEAL et transmise à Lahmeyer qui a déterminé les ressources solaires de chaque site avec les bases de données SWERA et METEONORM. Lahmeyer a recommandé l'utilisation de la base de données Sun and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) en raison de sa qualité et de sa gratuité. Lahmeyer a utilisé aussi la base de données METEONORM qui est un outil payant et régulièrement sollicité par les concepteurs de projets solaires pour réaliser des études plus fines. En plus de

l'utilisation de ces outils, nous introduisons dans cette étude l'outil NASA's Surface Meteorology and Surface Energy (NASA SSE) ; l'objectif étant de réaliser une évaluation de cet outil afin de le recommander pour dans le cadre des méthodologies d'évaluation de sites pour centrales CSP. NASA SSE est un outil reconnu, largement utilisé et gratuit. Nous soulignons ici que la comparaison des ressources solaires est présentée pour uniquement 4 sites (les plus prometteurs) [11] : Kenadsa, Abadla, Centrale de Naâma, Ain Ben Khelil (Fig 3.).

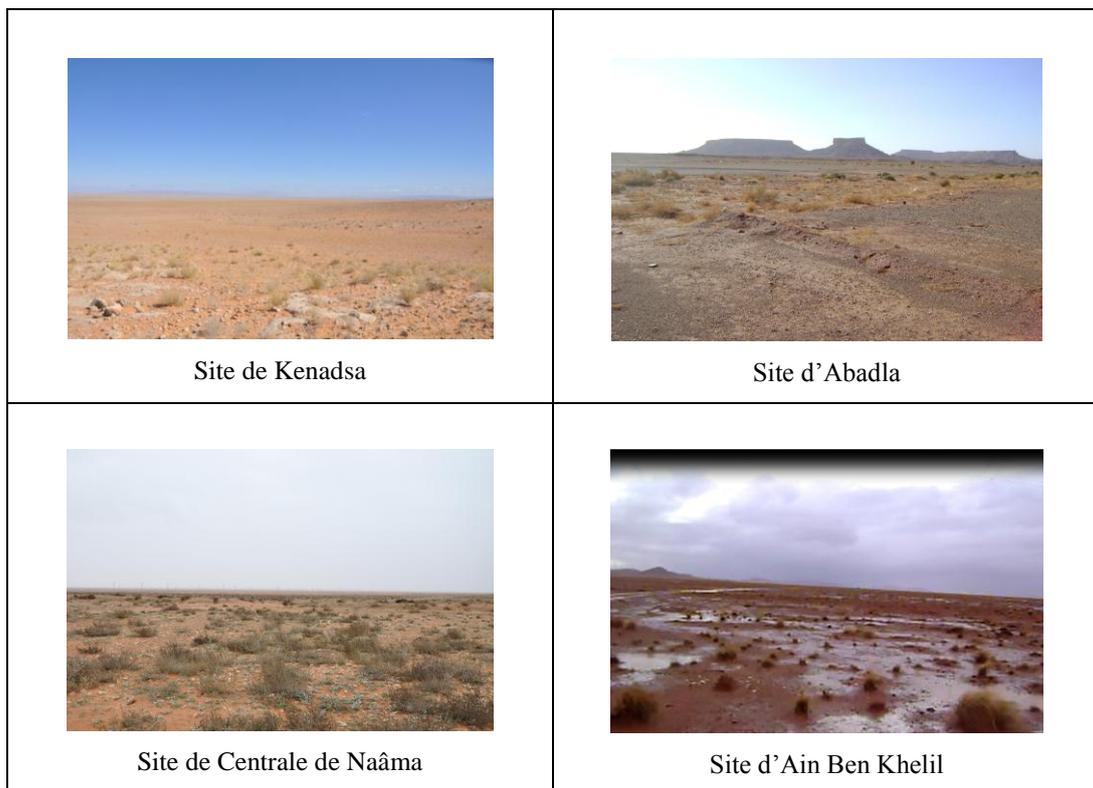


Fig 3. Photos des 4 sites potentiels [16]

Nous avons choisi de travailler sur un nombre restreint de sites afin que l'analyse soit plus claire à présenter. Les valeurs annuelles de DNI obtenues à partir des bases de données SWERA, METEONORM et NASA SSE sont présentés dans ce qui suit (Tab 1.). Chaque valeur annuelle d'un site potentiel représente la somme des 12 valeurs mensuelles du DNI. Ces dernières sont récupérées à partir des trois bases de données (NASA SSE, SWERA, METEONORM).

Tab 1. Valeurs annuelles du DNI pour les 4 sites potentiels [17-18]

	Kenadsa	Abadla	Centrale de Naâma	Ain Ben Khelil
SWERA	2 121	1 905	2 307	1 864
METEONORM	2 559	2 451	2 145	2 021
NASA SSE	2 435	2 416	2 298	2 274

L'analyse des résultats de cette étude porte sur 2 volets : 1) les valeurs annuelles du DNI, 2) l'évolution des valeurs mensuelles du DNI.

Tout d'abord, nous nous intéressons aux valeurs annuelles de DNI pour chaque site afin de voir quel est le site présentant le plus fort taux d'ensoleillement. Nous allons comparer en particulier les valeurs fournies par les différentes bases de données considérées pour notre étude, afin d'apprécier le degré de variabilité de ces données. Ce dernier représente le caractère plus ou moins dispersé des valeurs mensuelles du DNI. Il y a lieu de souligner ici que lorsque l'on veut étudier les ressources solaires d'un site destiné à une centrale CSP, on s'intéresse surtout à la valeur annuelle du DNI du site en question.

En observant les données fournies par l'outil recommandé par EMPOWER, c'est-à-dire SWERA, nous relevons que les meilleurs sites en termes de DNI sont ceux de la Centrale de Naâma et de Kenadsa avec respectivement des valeurs de 2 307 kWh/m²/an et 2 121 kWh/m²/an. Ces valeurs sont sensiblement au-dessus de celles des autres sites (Abadla et Ain Ben Khelil). Ces derniers présentent respectivement des valeurs de 1 905 kWh/m²/an et 1 864 kWh/m²/an.

En faisant appel à un outil plus fin, en l'occurrence METEONORM, les tendances relevées sont différentes de celles observées pour l'outil SWERA. Nous observons en effet que les données des sites de la wilaya de Béchar présentent des valeurs de DNI bien plus importantes que ceux des 2 autres sites (de la wilaya de Naâma). Les sites situés plus au sud présentent un ensoleillement annuel de l'ordre de 2 400 – 2 500 kWh/m²/an tandis que les sites plus au nord présentent un ensoleillement annuel de l'ordre de 2 000 – 2 100 kWh/m²/an.

En considérant le 3^{ème} outil (NASA SSE) que nous avons sélectionné pour cette étude du fait de son utilisation très large au sein des utilisateurs des données solaires, nous relevons que les résultats sont mitigés. La valeur la plus élevée pour le DNI est pour les sites de la wilaya de Béchar : Kenadsa (2 435 kWh/m²/an) et Abadla (2 416 kWh/m²/an). Viennent ensuite les sites de la wilaya de Naâma (2 298 kWh/m²/an pour le site Centrale de Naâma et 2 274 kWh/m²/an pour le site d'Ain Ben Khelil). Les sites les plus au sud (Kenadsa et Abadla) présentent

l'ensoleillement le plus intense. Les 2 sites de la wilaya de Naâma présentes des valeurs de DNI quasi-identiques. Ce sont 2 sites qui sont géographiquement très proches.

Pour aller plus loin dans l'analyse des ressources solaires, nous considérons pour chaque site la moyenne arithmétique ainsi que la dispersion autour de cette grandeur en considérant le coefficient de variation (ou écart-type relatif) (Tab 2.).

Tab 2. Valeurs annuelles du DNI pour les 4 sites potentiels

	Moyenne arithmétique (kWh/m ² /an)	Coefficient de variation (%)
Kenadsa	2 372	8
Abadla	2 257	11
Centrale de Naâma	2 250	3
Ain Ben Khelil	2 053	8

Le coefficient de variation est défini par la relation suivante :

$$Cv = \sigma / \mu \tag{4}$$

L'écart-type σ est défini par la relation classique suivante (σ^2 étant la variance) :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N} \tag{5}$$

Où :

N est le nombre de bases de données utilisées (ici N = 3) ;

X_i est la valeur annuelle du DNI considérée pour une base de données ;

μ est la moyenne arithmétique des X_i.

Cette approche nous permet de visualiser et d'analyser pour chaque site les écarts des valeurs fournies par les 3 bases de données. Elle nous permet aussi de comparer les résultats obtenus pour les 4 sites faisant l'objet de l'étude en vue de leur classement.

Les moyennes arithmétiques des 4 sites varient entre 2 053 et 2 372 kWh/m²/an. L'ensemble de ces données sont donc dans la fourchette des 2 000 – 2 300 kWh/m²/an. Le taux

d'ensoleillement est donc relativement différent selon le site considéré. Cependant, les 4 sites présentent des valeurs au-dessus des seuils exigés (1 900 kWh/m²/an). Le même constat peut être fait pour le seuil recommandé (2 100 kWh/m²/an), exception faite du site d'Ain Ben Khelil. Ce sont donc de bons sites du point de vue des ressources solaires. En termes de classement de ces sites vis-à-vis du critère « ressource solaire - DNI », nous avons par ordre décroissant : Kenadsa, Abadla, Centrale de Naâma, Ain Ben Khelil ; les 2 sites (Abadla et Centrale de Naâma) ont un DNI quasi-identique, en prenant en considération la précision des données satellitaires. Il y a lieu de dire ici que la sélection d'un site pour y ériger une centrale CSP est un problème multicritères et non pas un critère basé seulement sur les ressources solaires. La différenciation entre les 4 sites et leur classement final va dépendre des autres critères de sélection de sites.

Concernant la dispersion des données DNI autour de la valeur moyenne, nous relevons qu'elle est plus importante pour les sites de la wilaya de Béchar (8 à 11 %) que pour les sites de la wilaya de Naâma (3 à 8 %). Donc cette dispersion dépendrait des régions faisant l'objet de l'étude. Pour les sites de la wilaya de Naâma, l'utilisation de plusieurs bases de données pour estimer le DNI du site a relativement peu d'impact sur le résultat final. Ce n'est pas tout à fait le cas pour les sites de la wilaya de Béchar.

Après avoir analysé les données annuelles de DNI, nous présentons les évolutions des valeurs du DNI tout au long de l'année pour les 4 sites faisant l'objet de la présente étude (Tab 3. à Tab 5. et Fig 4.). Il s'agit de valeurs mensuelles.

L'observation de ces valeurs pour les 4 sites potentiels et les 3 bases de données montre à prime abord une grande variabilité des données DNI, ce qui rend l'analyse de ces données très délicate, surtout si l'on augmente le nombre de sites potentiels et/ou le nombre d'outils utilisés. Ceci n'est pas étonnant du fait que chaque base de données a été conçue et mise en œuvre séparément avec sa propre approche. L'étude statistique pourrait être un moyen de tirer un profil "moyen" de ces données. C'est ce que l'on verra par la suite. Pour les sites de la wilaya de Naâma, nous observons de manière claire que les valeurs les plus élevées de DNI sont situées en saison estivale, tandis que les valeurs les moins élevées sont situées en saison hivernale. Ces allures sont beaucoup moins marquées pour les sites de la wilaya de Béchar. Par ailleurs, il est à noter que la variation saisonnière des valeurs moyennes mensuelles de DNI de SWERA est assez élevée par rapport aux autres bases de données.

Tab 3. Valeurs mensuelles du DNI pour les 4 sites potentiels [17] - SWERA

Mois	Kenadsa	Abadla	Centrale de Naâma	Ain Ben Khelil
Janvier	148	123	105	62
Février	148	134	89	68
Mars	153	142	150	93
Avril	148	133	179	116
Mai	176	171	225	171
Juin	221	202	272	242
Juillet	205	171	274	274
Août	225	193	274	265
Septembre	234	197	282	251
Octobre	177	181	195	153
Novembre	152	143	161	101
Décembre	133	115	101	68

Tab 4. Valeurs mensuelles du DNI pour les 4 sites potentiels [18] - METEONORM

Mois	Kenadsa	Abadla	Centrale de Naâma	Ain Ben Khelil
Janvier	225	206	123	124
Février	197	187	126	103
Mars	268	242	193	184
Avril	224	231	203	186
Mai	207	203	240	224
Juin	236	226	280	251
Juillet	219	206	251	218
Août	209	201	210	200
Septembre	196	190	173	184
Octobre	203	200	142	144
Novembre	187	182	112	104
Décembre	189	177	91	99

Tab 5. Valeurs mensuelles du DNI pour les 4 sites potentiels [17] – NASA SSE

Mois	Kenadsa	Abadla	Centrale de Naâma	Ain Ben Khelil
Janvier	187	184	134	133
Février	187	185	155	153
Mars	216	214	187	170
Avril	235	234	218	217
Mai	237	236	245	245
Juin	223	222	253	253
Juillet	226	225	274	274
Août	202	201	236	236
Septembre	187	186	197	197
Octobre	189	187	155	153
Novembre	173	171	124	124
Décembre	173	171	120	119

En comparant les 3 bases de données pour les 4 sites, nous relevons que les données de NASA SSE et de METEONORM sont assez proches, tandis que les données de SWERA s'écartent de manière sensible, surtout en saison hivernale. Rappelons-le ici que l'outil SWERA a été recommandé par le maître d'œuvre du programme EMPOWER. Ce résultat devra être regardé de plus près d'une part en considérant des bases de données supplémentaires et d'autre part par le choix d'autres sites potentiels à étudier.

Pour enrichir notre analyse, nous allons considérer le site de Hassi R'Mel (Fig 5.) qui est mitoyen à la 1^{ère} et seule centrale CSP en Algérie. Il s'agit de Solar Power Plant One (SPP1) implantée à Tilghemt (près de Hassi R'Mel) et dont l'exploitation a débuté en 2011. SPP1 est à l'heure actuelle le projet de référence du CSP en Algérie. Ceci nous a motivé à intégrer ses données DNI en complément de cette étude.

Les valeurs annuelles du DNI du site de Hassi R'Mel varient de 1 756 kWh/m²/an (SWERA) à 2 420 kWh/m²/an (NASA SSE), en passant par 2 257 kWh/m²/an pour l'outil METEONORM (Tab 6.). La valeur de SWERA est très éloignée des 2 autres valeurs (- 22 % par rapport à METEONORM et - 27 % par rapport à NASA SSE); les valeurs de METEONORM et NASA SSE sont quant à elles relativement proches (- 7 %). Si nous devons estimer sur cette base la valeur annuelle du DNI, on serait amené à exclure la valeur donnée par SWERA et à moyenner les valeurs données par les deux autres outils. Le comportement

de l’outil SWERA est visible sur la courbe qui représente les valeurs mensuelles du DNI du site de Hassi R’Mel sur une année (Fig 6.). Les données qui ont permis la construction de cette courbe sont présentées (Tab 7.). La courbe du DNI mensuel montre bien le décalage tout au long de l’année des valeurs de SWERA par rapport aux valeurs données par les deux autres outils (NASA SSE et METEONORM).

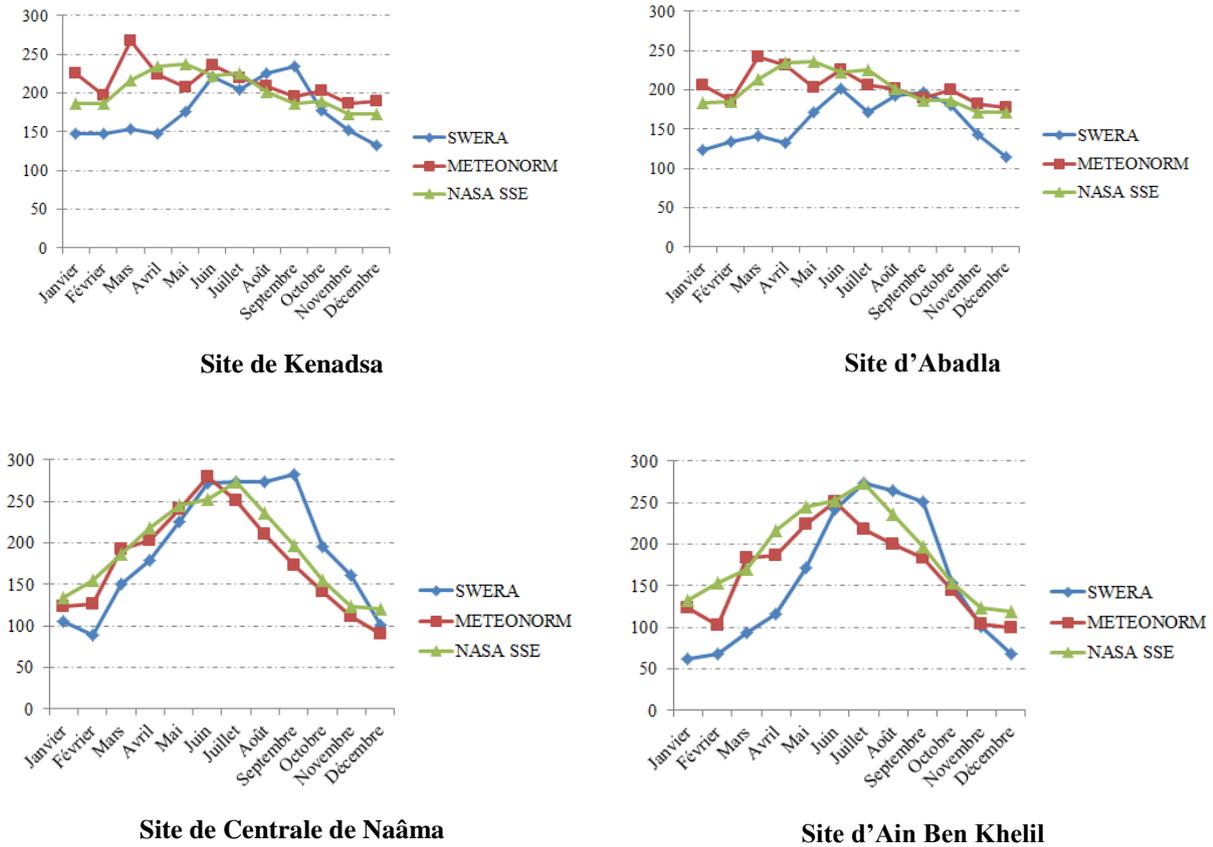


Fig 4. Valeurs mensuelles du DNI pour les 4 sites potentiels, en kWh/m²/mois



Fig 5. Photo du site de Hassi R’Mel [19]

Tab 6. : Valeurs annuelles du DNI pour le site de Hassi R'Mel

	Hassi R'Mel
SWERA	1 756
METEONORM	2 257
NASA SSE	2 420

Tab 7. : Valeurs mensuelles du DNI pour le site potentiel de Hassi R'Mel [17 ; 19]

Mois	SWERA	METEONORM	NASA SSE
Janvier	133	135	136
Février	140	201	168
Mars	154	261	208
Avril	179	149	245
Mai	148	206	259
Juin	156	223	253
Juillet	146	208	282
Août	162	211	257
Septembre	162	186	203
Octobre	131	207	156
Novembre	117	132	129
Décembre	127	137	124

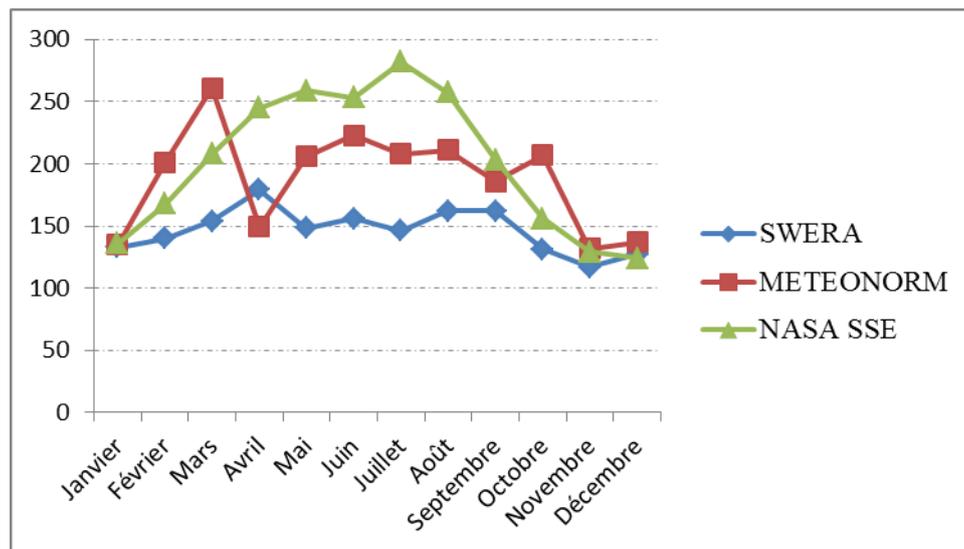


Fig 6. Valeurs moyennes mensuelles du DNI, site de Hassi R'Mel, en kWh/m²/mois

Par ailleurs, les valeurs de SWERA sont plus « écrasés » que celles fournies par les outils NASA SSE et METEONORM, affichant ainsi une variabilité saisonnières plus faible pour les valeurs du DNI. Enfin, si nous comparons la valeur annuelle du DNI du site de Hassi R'Mel avec les 4 autres sites ; nous pouvons proposer à cet effet deux scénarios possibles. Le 1^{er} scénario correspond à la prise en compte des 3 outils : NASA SSE, SWERA et METEONORM. Dans ce cas, le site de Hassi R'Mel présente une valeur moyenne arithmétique du DNI de 2 144 kWh/m²/an ce qui le met en 4^{ème} position en termes de ressources solaires après les sites de Kenadsa, Abadla et Centrale de Naâma. Dans le 2^{ème} scénario, l'outil SWERA est exclu de l'analyse. Dans ce cas, le site de Hassi R'Mel présente une nouvelle valeur moyenne arithmétique du DNI bien plus élevée (2 339 kWh/m²/an), ce qui rapproche les performances de ce site des sites de la Wilaya de Béchar (2 498 kWh/m²/an pour le site de Kenadsa et 2 434 kWh/m²/an pour le site d'Abadla). Les sites de la Wilaya de Naâma présentent dans ce cas des valeurs de 2 222 kWh/m²/an pour le site de la Centrale de Naâma et 2 148 kWh/m²/an pour le site d'Ain Ben Khelil.

6. Conclusions

Dans le cadre de cet article, nous avons présenté une méthodologie d'évaluation de sites pour des centrales CSP. Nous avons présenté à cet effet les principaux critères qui à notre sens devraient être pris en compte pour évaluer des sites pour centrales CSP dans le contexte Algérien. Nous nous sommes focalisés par la suite sur le critère d'évaluation le plus important, à savoir celui qui porte sur les ressources solaires (DNI). Nous avons recours à plusieurs bases de données (3) afin d'analyser les différences qui existent entre les données DNI pour un site potentiel donné puis ces données ont été comparées entre les sites potentiels considérés. A cet effet, un cas d'étude a été analysé. Il s'agit du volet Algérien du programme EMPOWER. Ce cas d'étude nous a permis en particulier d'évaluer les outils (ou bases de données) de ressources solaires NASA SSE et SWERA en vue de les recommander pour cette méthodologie.

Suite à l'analyse menée ci-dessus, nous recommandons l'utilisation de NASA SSE, qui est un outil gratuit et efficace, pour l'évaluation des ressources solaires en vue de l'identification de sites pour centrales CSP. SWERA pourrait être aussi recommandé ; cependant il semble présenter des données moins précises que celles de NASA SSE. Il doit être à cet effet mieux évalué. L'outil METEONORM reste conseillé pour des études d'évaluation plus fines.

Les principales perspectives à cette étude, portent en premier lieu sur une analyse de sensibilité de cette étude à un nombre variable de sites potentiels et de bases de données. En second lieu, il y a lieu de prendre en compte les critères autres que le DNI car l'évaluation d'un site pouvant accueillir une centrale CSP est un problème essentiellement multicritères. Par ailleurs, nous recommandons de tester cette méthodologie sur le terrain. Il s'agit par exemple, d'identifier des projets qui vont avoir lieu en Algérie et d'en profiter pour évaluer la méthodologie. En dernier lieu, il y a lieu d'étendre cette méthodologie et de l'adapter aux projets de fermes photovoltaïques (> 1 MW) qui représentent à l'heure actuelle une part prépondérante du programme Algérien des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

7. Références

- [1] World Energy Outlook 2020, International Energy Agency (iea), www.iea.org/weo ; 2020 [accès le 29 Novembre 2020].
- [2] Solar Power & Chemical Energy Systems (SolarPACES), Energy Technology Network, International Energy Agency (iea), <https://www.solarpaces.org> ; 2020 [accès le 29 Novembre 2020].
- [3] Schlecht M., Meyer R., Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems , Woodhead Publishing Limited ; 2012, pp. 91-119.
- [4] Günther M., Joemann M., Advanced CSP teaching materials, chapter 14 : Site assessment, enerMENA, DLR ; 2012.
- [5] Uyan M., GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey, *Renew. Sust. Energy Rev.* (28); 2013, pp. 11-17 ; doi : 10.1016/j.rser.2013.07.042.
- [6] Gastli A., Charabi Y., Zekri S., GIS-based assessment of combined CSP electric power and seawater desalination plant for Duqum-Oman, *Renew. Sust. Energy Rev.* (14) ; 2010, pp. 821-827 ; doi : 10.1016/j.rser.2009.08.020.
- [7] Broesamle H., Mannstein H., Schillings C., Trieb F., Assessment of solar electricity potentials in north Africa based on satellite data and a geographic information system, *Solar energy* (70) ; 2001, pp. 1-12 ; doi : 10.1016/S0038-092X(00)00126-2.
- [8] Azoumah Y., Ramdé EW, Tapsoba G., Thiam S., Siting guidelines for concentrating solar power plants in the Sahel : Case study of Burkina Faso, *Solar energy* (84) ; 2010, pp. 1545-1553 ; doi : 10.1016/j.solener.2010.05.019.

- [9] Ramdé EW, Azoumah Y, Brew-Hammond A, Rungundu A, Tapsoba G., Site ranking and potential assessment for concentrating solar power in west Africa, *Natural Resources* (4) ; 2013, pp. 146-153 ; doi : 10.4236/nr.2013.41A019.
- [10] Sánchez-Lozano JM, Garcia-Cascales MS, Lamata MT, Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power plants, *Computers & Industrial Engineering* (87) ; 2015, pp. 343-355 ; doi : 10.1016/j.cie.2015.05.028.
- [11] Merrouni AA, Elalaoui FE, Ghennioui A, Mzrhab A, Mzrhab A, A GIS-AHP combination for the sites assessment of large-scale CSP plants with dry and wet cooling systems. Case study: Eastern Morocco, *Solar energy* (166) ; 2018, pp. 2-12 ; doi : 10.1016/j.solener.2018.03.038.
- [12] Wilbert S, U 10-12 : Solar radiation, Capacity building course eM-CB01 ; 2010, enerMENA, DLR.
- [13] Günther M, Advanced CSP teaching materials, chapter 2 : Solar radiation, enerMENA, DLR ; 2012.
- [14] Exploring and Motivating Sustainable POWER Markets, Lahmeyer International GmbH, EMPOWER Program Phase II ; February 2010.
- [15] <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview> ; 2020 [accès le 29 Novembre 2020].
- [16] Country Visit Report, New Energy Algeria, NEAL, Lahmeyer International GmbH, EMPOWER Program Phase II ; March 2010.
- [17] Site internet de SWERA : [https://openei.org/wiki/Solar and Wind Energy Resource Assessment \(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA)) ; 2020 [accès le 29 Novembre 2020]. Site internet de NASA SSE : <https://power.larc.nasa.gov/> ; 2020 [accès le 29 Novembre 2020].
- [18] Summary Algeria rev2, METEONORM V.6.0.2.5., Lahmeyer International GmbH, EMPOWER Program Phase II ; March 2010.
- [19] Due Diligence Technique du projet Solar Power Plant One (SPP1, Hassi R'Mel), Rapport final par Lahmeyer International GmbH ; Novembre 2006.

Nomenclature

- C_v Coefficient de variation (Ecart-type relatif), %
- DNI Direct Normal Irradiation, kWh/m²
- G éclairage énergétique, W/m²

- μ Moyenne arithmétique
- N Nombre de bases de données considérées (ici $N = 3$)
- σ Écart-type
- X Valeur annuelle du DNI, kWh/m²

Indices

- clair ciel clair
- d direct
- i base de données considérée