

Identification des sites favorables à l'installation des centrales solaires photovoltaïques à l'aide de l'analyse multicritères et des SIG : Cas de l'arrondissement de Bélabo, Cameroun

[Identification of suitable sites for the installation of solar photovoltaic stations with the multi-criteria analysis and GIS : Case of Bélabo Council, Cameroon]

Tegno Nguekam Eric Wilson¹ and Kamtchoua Mbetjock Camille²

¹Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD), Nkolbisson, Yaoundé, P. Box: 2123, Messa, Yaoundé, Cameroon

²Institut Supérieur de Management et des Sciences Appliquées (ISMASA Hermès), Yaoundé, Cameroon

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: As energy supply and demand are unevenly distributed on the planet, it is necessary to find another solution to take over. It is now a question of using a cheap and economical source of energy because the protection of the environment has become an important issue. In this regard, renewables energies such as solar energy (sun), wind (wind) or hydraulic (water), geothermal (the heat of the earth's subsoil) considered as inexhaustible and easily exploitable energies appear as a solution to solve the problem. In Cameroon, for example, in the context of the use of solar energy and the opening up of energy in rural areas, the government has set up the electrification program of 1000 localities with solar photovoltaic system. The objective of this study was to identify through GIS and multi-criteria analysis, the suitable sites dedicated to the implementation of solar power stations in the Bélabo council in eastern Cameroon. The methodology consisted in the identification of the criteria (factors and constraints), in the classification and standardization of these criteria, and in their aggregation for the identification of suitable sites. This study has shown that 9% of the total area of Bélabo council has a high potential to be optimal areas for the installation of solar photovoltaic stations.

KEYWORDS: Solar photovoltaic system; sites; AHP method; criteria; factors and constraints.

RESUME: L'offre et la demande en énergie étant inégalement réparties sur la planète, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais. Il s'agit désormais d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un enjeu important. A ce sujet, Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire (soleil), éolienne (vent) ou hydraulique (eau), géothermique (la chaleur du sous-sol terrestre) considérées comme des énergies inépuisables et facilement exploitables apparaissent comme une solution envisagée pour résoudre le problème. C'est ainsi qu'au Cameroun dans le cadre de l'utilisation de l'énergie solaire et du désenclavement énergétique des zones rurales, le gouvernement a mis en place le programme d'électrification des 1000 localités par système solaire photovoltaïque. L'objectif de cette étude était d'identifier à travers les SIG et de l'analyse multicritère les sites propices à l'installation des centrales solaires dans l'arrondissement de Bélabo dans l'Est Cameroun. La méthodologie a consisté en l'identification les critères (facteurs et contraintes), en la classification standardisation de ces critères, et en leur agrégation pour ressortir les zones propices à l'installation des centrales solaires. Cette étude a ainsi permis de montrer que 9% de la superficie totale de Bélabo présentent un potentiel élevé pour être des zones optimales à l'installation des centrales.

MOTS-CLEFS: Système solaire photovoltaïque ; Sites ; SIG ; Méthode AHP ; Critères, facteurs, contraintes.

1 INTRODUCTION

Dans le monde, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel et l'uranium [1]. C'est ainsi que, ces produits deviennent de plus en plus rares pendant que la demande énergétique du monde s'élève continuellement. K.kassmi en 2007 dans la revue des énergies renouvelables estime que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont menés sur la production et la consommation. Ces formes d'énergie sont extraites du sous-sol et ne se reconstituent pas d'où le nom d'énergies non renouvelables [2].

L'offre et la demande en énergie étant inégalement réparties sur la planète, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais [3]. La contrainte imposée est donc d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important. A ce sujet, Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire (soleil), éolienne(vent) ou hydraulique(eau), géothermique (la chaleur du sous-sol terrestre), considérées comme des énergies inépuisables et facilement exploitables apparaissent comme une solution envisagée pour résoudre le problème [4].

Tous les Etats de la société contemporaine sont ainsi tenus par un besoin de production massive d'énergie pour soutenir leur croissance [3]. Le Cameroun ne déroge pas à cette contrainte. Ainsi le Gouvernement camerounais, dans un essai de solution au déficit énergétique et pour garantir à long terme la sécurité d'approvisionnement en énergie électrique au moindre coût, a élaboré un Plan de Développement du Secteur de l'Électricité (PDSE) à l'horizon 2030 [2]. Ce plan dont les grands axes sont déclinés dans le Document de Stratégie pour la Croissance et l'Emploi (DSCE), définit le programme d'investissement optimal des moyens de production énergétique pour le pays, programme essentiellement construit autour du potentiel hydroélectrique, ainsi que des réserves de pétrole et de gaz naturel dont regorge le Cameroun [5]. Bien que le PDSE n'a pas défini une politique propre aux énergies renouvelables, le DSCE, après avoir rappelé que les inventaires effectués ont mis en évidence l'existence au Cameroun d'importants potentiels en énergies renouvelables, ainsi que des possibilités concrètes de développement et d'utilisation de ces formes d'énergie dans la satisfaction des besoins énergétiques nationaux, attire l'attention des autorités camerounaises à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables [4]. C'est ainsi que dans le cadre de l'utilisation de l'énergie solaire et du désenclavement énergétique des zones rurales le gouvernement a mis en place le programme d'électrification de 1000 localités par système solaire photovoltaïque. Ce projet, fruit de la coopération sino-camerounaise est lancé en 2016 par une phase pilote dont l'objectif est de desservir par le biais des centrales solaires photovoltaïques 166 localités rurales à travers le territoire national [6].

L'accès à l'électricité est reconnu comme un facteur d'amélioration du bien-être des populations [4]. Le réseau de la Société ENEO (anciennement AES-SONEL), service public d'électricité chargé de fournir l'énergie à tous les ménages camerounais sans exclusivité, ne couvre pas toutes les localités du pays [6]. Lorsque la distance du site rural au réseau national est importante, l'Etat doit favoriser des installations décentralisées en instaurant des mesures favorables aux populations concernées. Mais cette solution reste peu répandue [2]. Or, sur la base des données du recensement général de la population réalisée en 1987, le Cameroun compte un total de 13 104 localités [4]. La population totale en 2004 étant estimée à 16,5 millions d'habitants pour environ 3,2 millions de ménages, seulement environ 3000 localités sont électrifiées [6]. Malgré l'effort étatique mise en place par la création de l'agence électrification rurale (AER), l'électricité reste le privilège des résidents des villes (80,7% des ménages urbains, contre 16,4% des ménages ruraux) [4]. Face à cette situation, l'état a décidé de mettre sur place un système de production d'électricité par système solaire. La faisabilité d'un projet solaire ne dépend pas uniquement du soleil : le site le plus ensoleillé n'est pas nécessairement le plus favorable à l'implantation d'une centrale solaire [7]. Il peut être confronté à des législations et contraintes économiques, socio-politiques ou environnementales. De ce fait, les questions suivantes se posent : Sur quels critères serait basée l'évaluation des sites optimaux à l'implantation des centrales ? Comment hiérarchiser les facteurs choisis ? Où seront situés les sites potentiels pour l'implantation ?

L'objectif principal de cette étude était d'identifier à l'aide des SIG et de l'approche multicritère, les sites dédiés à l'installation des centrales solaires photovoltaïques dans l'arrondissement de Bélabo à l'Est Cameroun. Spécifiquement, il était question de déterminer les critères d'aide à la localisation des potentiels sites ; de mettre en place une pondération et hiérarchisation de ces critères à l'aide de l'analyse multicritère ; d'identifier les sites à forts potentiels énergétiques et proposer les zones d'implantation des centrales.

2 MATÉRIELS ET METHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

Créé le 14 novembre 1979 par le décret n°79-470, l'arrondissement de BELABO est situé à l'Est du Cameroun, dans le Département du LOM et DJEREM à une distance d'environ 80 Km de Bertoua, chef-lieu du Département. En outre, cet

arrondissement s'étend respectivement entre 255000m et 381987m en abscisse et entre 506030 m et 617821m en ordonnées. Elle couvre une superficie d'environ 6 000 Km² et est limitrophe au Nord par l'arrondissement de BETARE OYA, à l'Est par l'arrondissement de MANDJOU, au Sud-Est par l'arrondissement de BERTOUA 1, au Sud par les arrondissements de NSEM et MINTA, au Sud-Ouest par celui de DIANG, à l'Ouest par YOKO [8]. La figure 1 présente la localisation géographique et administrative de l'arrondissement de Bélabo.

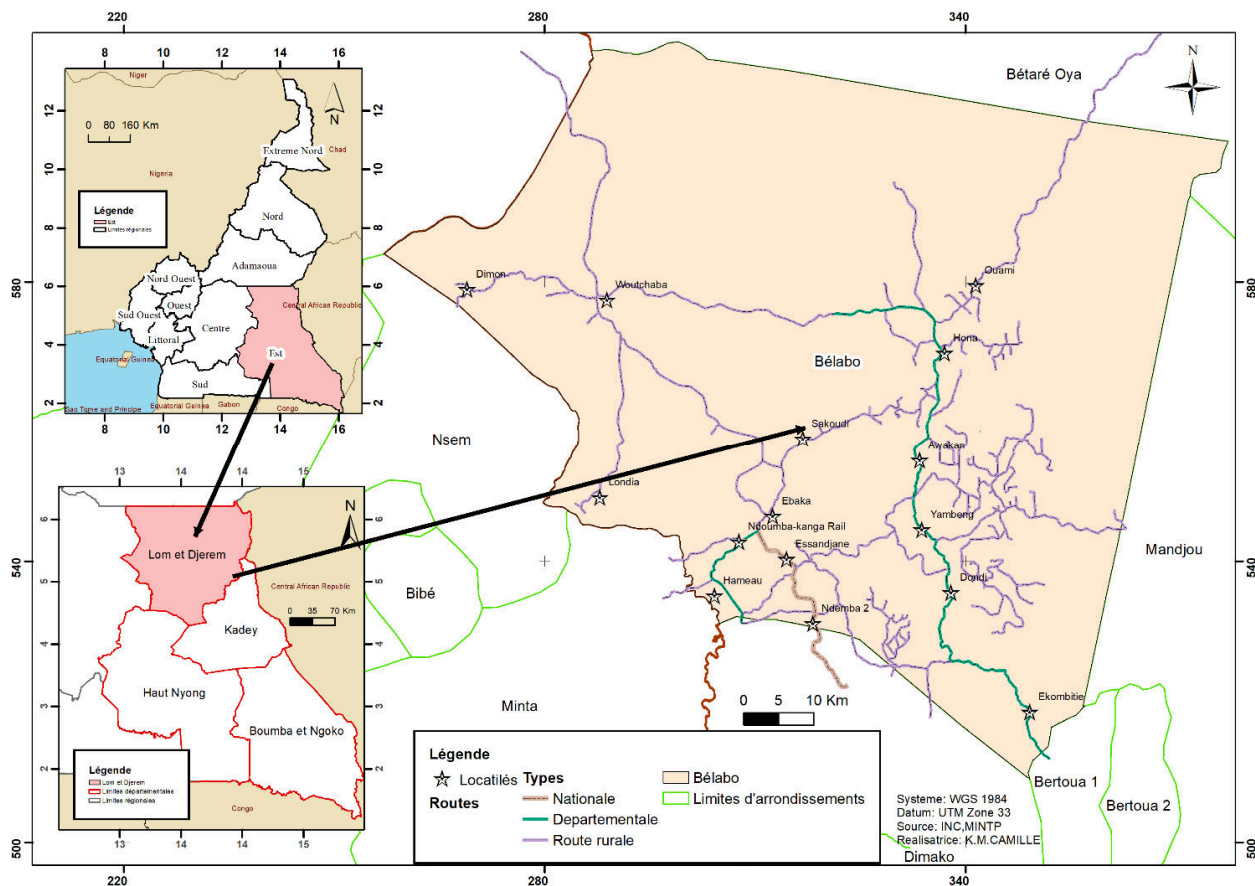


Fig. 1. Localisation administrative et géographique de l'arrondissement de Bélabo

2.2 MATÉRIELS

Le tableau 1 ci-dessous présente le matériel utilisé dans cette étude.

Tableau 1. Liste et utilité du matériel utilisé

Noms	Utilités
Appareils	
Solarimètre	Permet de mesurer l'intensité des rayonnements solaires reçus en un point, de déterminer les angles d'incidence pour optimiser le positionnement des panneaux solaires et mesurer la transmission du soleil à travers un verre transparent ou traité.
Analyseur de masque solaire	Permet de déterminer l'ensoleillement et l'ombrage sur les sites. Il permet également de faire les précisions d'ensoleillement sur une durée d'un an.
GPS	Pour déterminer les coordonnées de quelques points dans l'arrondissement de Belabo.
Ordinateur portable	Pour l'analyse des données et la rédaction du rapport
Logiciels	
Arcgis 10.3 et Qgis 2.18	Ces logiciels de Systèmes d'Information Géographique ont été utilisés pour la numérisation (digitalisation des cartes), conversion des fichiers, l'édition des données et leur modélisation, la visualisation des données spatiales créées, la gestion des informations spatiales et thématiques, l'analyse spatiale et la mise en page pour la production des documents sous forme de cartes et graphiques.
Erdas Imagine 2014	Conçu par la société Erdas (un des leaders du marché des logiciels de traitement d'image), ce logiciel offre des outils simples mais puissants et performants en télédétection et en photogrammétrie. Il a été utilisé, dans le cadre de cette recherche pour le traitement des images satellitaires de l'arrondissement de Bélabo.
Pvgis	Logiciel utilisé en modélisation photovoltaïque. Il donne un accès à la base de données Helioclim3 construit à partir des traitements d'images du satellite Meteosat Second Generation [9]. Il a donc été utilisé pour l'estimation de l'irradiation global horizontal dans différents sites de prélèvements.
Pvsyst	Logiciel performant pour les systèmes photovoltaïques. Il permet de faire des pré-dimensionnements à travers une estimation rapide de la production pour une première étude, une étude détaillée avec des simulations horaires, une base de données météorologiques sur l'irradiation, la température, l'humidité, etc....
Offline Map Maker	Application Windows conçue spécifiquement pour aider les utilisateurs à télécharger des images et cartes pour une consultation hors ligne. Cet outil permet obtenir des images de mosaïque à partir de Google Maps, ou des cartes, Openstreetmap, Yandex Maps, Bing, Yahoo etc.
Microsoft Office	Suite bureautique propriétaire de la société Microsoft fonctionnant avec les plates-formes fixes et mobiles. Il a été utilisé pour le traitement de texte, pour l'analyse statistique des données, ainsi que la création des graphiques etc...

2.3 DONNEES

Les données ont été utilisées pour la définition des critères. L'acquisition des données s'est faite à partir de plusieurs sources dont certains des bibliothèques de données spatiales, et d'autres des centres de recherche à travers leurs sites internet [10]. Le tableau 2 présente les données utilisées

Tableau 2. Données et sources

Données	Types	Sources
Limites administratives de Bélabo	Vecteur	Base de données de l'Institut National de Cartographie (INC)
Potentiel solaire	Raster	Acquis grâce à l'outil Pvgis crée par la firme JRC European Commission nous a procuré les données nécessaires à la création du potentiel solaire de l'arrondissement de Bélabo. Il permet la consultation et l'interrogation de la cartographie du gisement solaire[11].
Altitudes et pentes	Raster	Toutes deux sont obtenues à partir de la base de données de l'U.S. Geological Survey. Le MNT sélectionné est celui du <i>Shuttle Radar Topographic Mission</i> (SRTM) qui est une mission de la NASA destinée à obtenir des données globales d'élévation pour générer la base de données la plus précise et la plus complète au monde [10].
Occupation du sol	Raster	Provient du traitement des images satellitaires provenant de la huitième génération du satellite <i>Landsat</i> lancé par la NASA.
Données d'électrification	Statistiques	Les données sur l'électrification sont obtenues à l'aide des rapports du MINEE et complété à l'aide de la base de données de l'INS.
Température et humidité	Vecteur	Mesurés sur le terrain puis comparés avec les données extraites de la base de données de <i>Meteonorm 7.2</i> du logiciel <i>PVsystem</i> .

2.4 METHODE

Cette section décrit la démarche utilisée pour identifier les sites les plus appropriés à l'installation des centrales solaires photovoltaïques dans l'arrondissement de Bélabo.

2.4.1 IDENTIFICATION DES FACTEURS ET CONTRAINTES

La recherche d'un site potentiel se fait par une approche multicritère, elle demande une bonne concordance entre des critères économiques, sociaux et environnementaux [12]. En l'absence de légalisation et règlementations liées à l'énergie solaire au Cameroun [13], l'étude bibliographique et la reconnaissance de terrain ont permis de choisir le seuil des contraintes et les facteurs locaux pour la prospection de centrales solaires. Les facteurs et les contraintes les plus récurrents dans la littérature et adaptés à la structure ont été sélectionnés.

2.4.1.1 LES FACTEURS

- L'ensoleillement

L'ensoleillement se définit comme l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan perpendiculaire à un moment donné. C'est le facteur le plus important dans la détermination d'un site [14]. La conception d'un système photovoltaïque nécessite des données sur l'ensoleillement reçu sur un plan d'inclinaison donnée (valeurs quotidiennes sous forme de moyennes mensuelles). L'intensité du rayonnement reçu est fonction de plusieurs facteurs : de l'orientation du plan par rapport à l'horizontal et par rapport au sud (hémisphère nord), de la latitude du lieu, de la saison, des conditions météorologiques (nébulosité, poussières, humidité, ...), de l'heure [15]. Les données mensuelles de l'irradiation sont basées sur les calculs à partir d'images satellitaires effectuées par *Geostationary Meteosat* et *Polar EUMetSat*. Elles ont été prélevées à différents lieux de l'arrondissement de Bélabo puis interpolées par la méthode IDW afin d'en extraire les informations sur toute la zone d'étude (Figure2).

- La température

Les données de température ont été récupérées dans la base de donnée de *Meteonorm 7.2*, elles ont été traitées à l'aide des logiciels Qgis et Arcgis. Pour cela, la méthode d'interpolation IDW a permis d'avoir les informations sur une zone plus grande et l'outil d'analyse spatial « extract by mask » a permis de restreindre le résultat de l'interpolation à la zone d'étude. La figure 3 présente la variation de température d'un lieu à un autre dans l'arrondissement de Bélabo.

- L'occupation du sol

C'est un facteur environnemental important pour la détermination des sites propices. Selon la nomenclature de l'occupation des sols [16], on peut regrouper en ce terme tout objet naturel (végétation, culture, eau, etc.) et les différentes infrastructures humaines sur la surface terrestre [17]. D'après les études de Sadeghi et Karimi sur la détermination des sites pour centrales solaires dans la région Tehran en Iran, avoir un lieu propice à l'installation des centrales est un facteur indispensable ; d'où la nécessité de prendre en compte l'occupation du sol. C'est ainsi que les images satellitaires utilisées pour obtenir l'occupation du sol ont été traitées indépendamment puis mosaïquées afin d'extraire la zone d'étude. L'option choisie pour établir la carte d'occupation du sol était classification supervisée. C'est ainsi que quatre classes d'occupation du sol (zones habitées, la végétation, les sols nus, et les cours d'eau) ont été identifiées. La figure 4 présente l'occupation du sol de Bélabo.

- La topographie

D'après les études de Sadeghi et Kamini, le potentiel de la terre à usage industriel peut diminuer avec l'augmentation de la pente. A cet effet, il décrit le relief comme le facteur environnemental le plus important et stipule que la pente optimale doit être inférieure à 3%. L'altitude quant à elle, a une relation inverse avec l'épaisseur de l'atmosphère [14]. Une atmosphère plus épaisse a des composants plus épais, donc plus d'énergie serait absorbée ou réfléchi. Par conséquent, les hautes terres auraient plus de potentiel dans ce cas. Les figures 5 et 6 présentent le relief et le pourcentage des pentes dans l'arrondissement de Bélabo.

- L'humidité

L'humidité est le plus gros absorbeur d'énergie solaire [14]. Les endroits avec un pourcentage d'humidité élevé ne sont pas favorables pour la construction d'une station solaire. Le processus de traitement de l'humidité était le même que celui de la température. Cela a permis de produire la figure 7 qui présente le pourcentage d'humidité dans l'arrondissement de Bélabo.

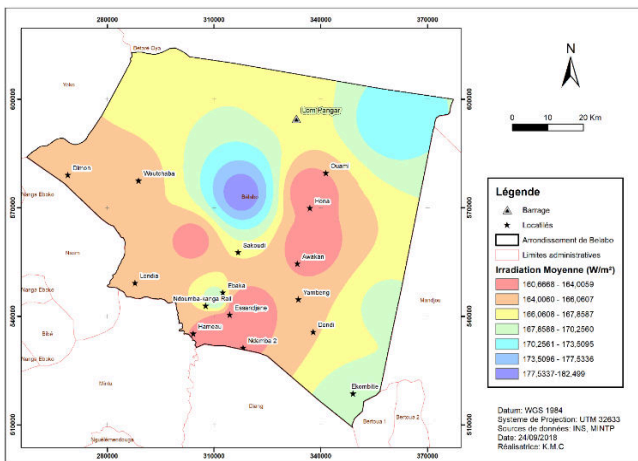


Fig. 2. Irradiation moyenne de l'arrondissement de Bélabo

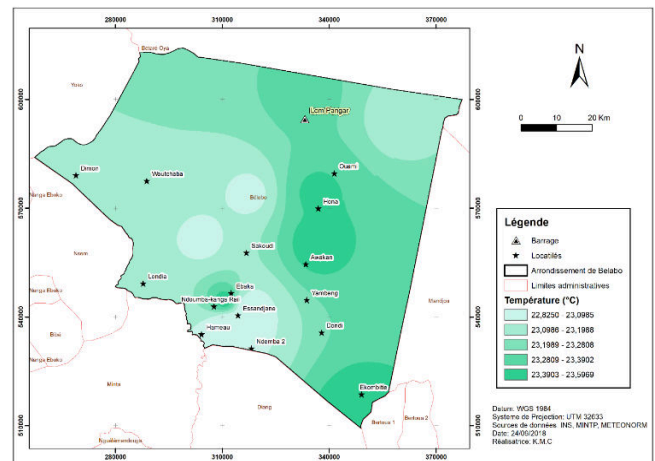


Fig. 3. Température moyenne de l'arrondissement de Bélabo

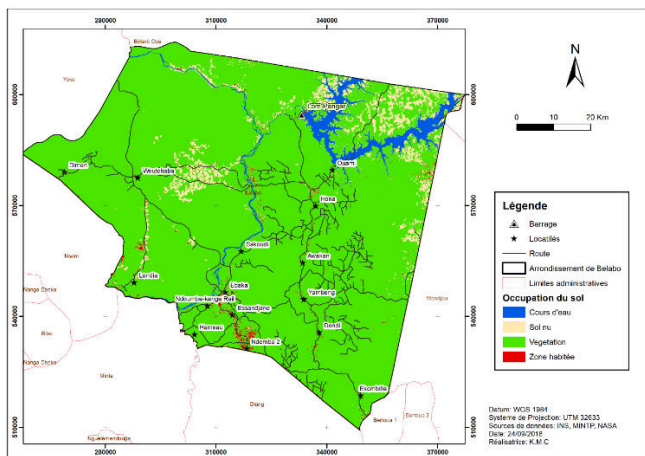


Fig. 4. Occupation du sol de l'arrondissement de Bélabo

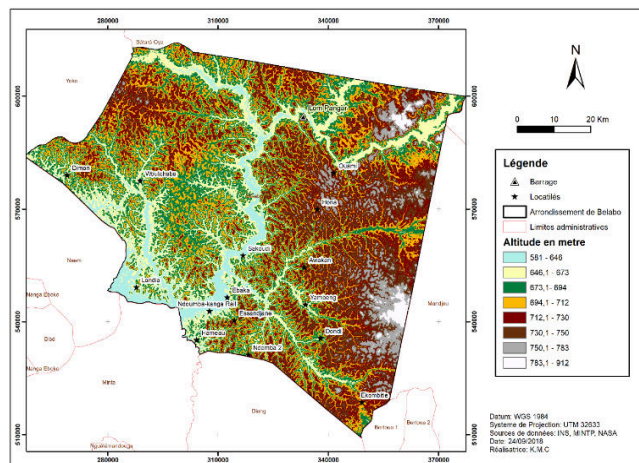


Fig. 5. Altitude de l'arrondissement de Bélabo

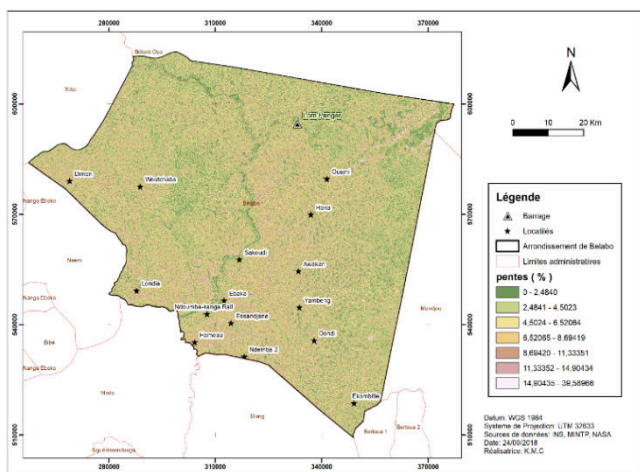


Fig. 6. Pentes de l'arrondissement de Bélabo

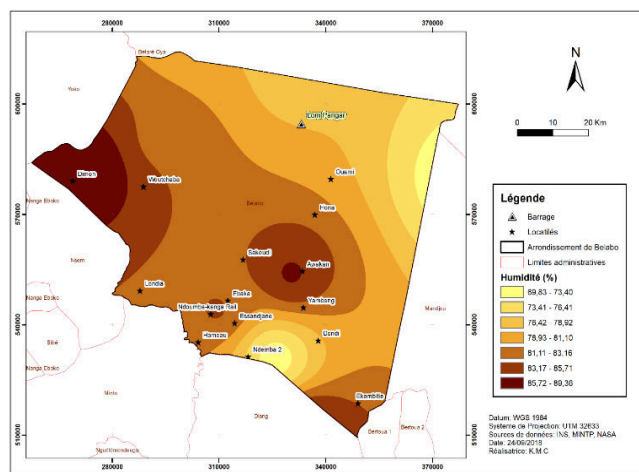


Fig. 7. Pourcentage d'humidité dans l'arrondissement de Bélabo

2.4.1.2 LES CONTRAINTES

- Proximité au réseau électrique existant

Le choix d'une technologie de construction des centrales solaires est orienté par les critères de position de la localité par rapport aux réseaux Moyenne et Haute Tension existants [18]. Le réseau conventionnel de distribution ENEO est la principale source d'électrification au Cameroun et a juste permis d'alimenter 3000 localités. La priorité à l'électrification conventionnelle est donnée aux localités à moins de 10 km du réseau, les plus peuplées et les plus faciles d'accès. De ces faits, le projet faisant l'objet de la présente étude, accentue son déploiement sur des localités à 20 km ou plus du réseau conventionnel, et dont la population s'établit de 60 à 400 ménages au maximum [6].

Mais le constat effectué lors de la descente sur sites a permis de nous rendre compte que ce paramètre n'est pas respecté à cause de l'absence total d'électricité malgré le passage du distributeur ENEO. De ces faits, il n'est plus pris en compte dans cette évaluation.

- La proximité au cours d'eaux, lacs et barrages

Constituant les sources d'approvisionnement pour les villages riverains, ces réserves hydrographiques se présentent comme des contraintes environnementales importantes pour la protection de la nature. Une pollution de ces ressources

entraînerait de nombreux dégâts au niveau du milieu humain [19]. A cet effet, les études de *Sadeghi* stipulent que la construction d'une centrale doit se faire au minimum à 500 m d'un cours d'eau et lacs [14] ; et à 1000 m d'un barrage [20].

Les données d'hydrographie étant issues de la base de donnée de l'Institut National de Cartographie (INC), elles ont ensuite été circonscrites à l'arrondissement à l'aide de l'outil d'analyse spatial « Clipping ». Le résultat de cette analyse nous a ainsi permis de calculer la distance aux cours d'eau à travers l'outil d'analyse spatial « distance euclidienne ». La figure 8 présente les distances au cours d'eau de l'arrondissement.

- La proximité au réseau routier

La construction d'une centrale solaire à proximité des routes réduit les dépenses de services publics et de transport de groupe. L'équipement industriel ne doit pas être construit dans la zone tampon de plus 250 mètres des routes principales [14]. La figure 9 présente la proximité au réseau routier dans l'arrondissement.

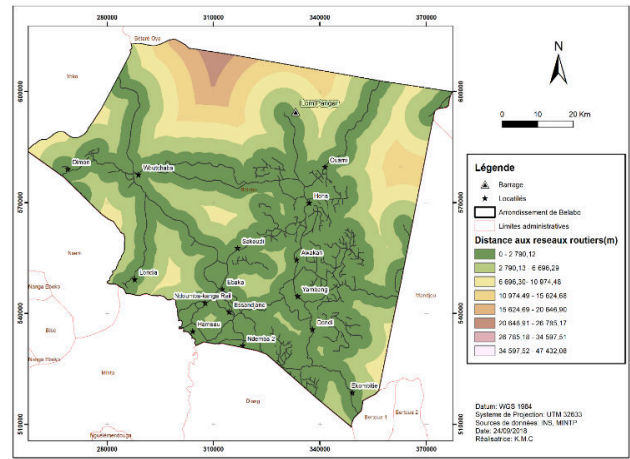
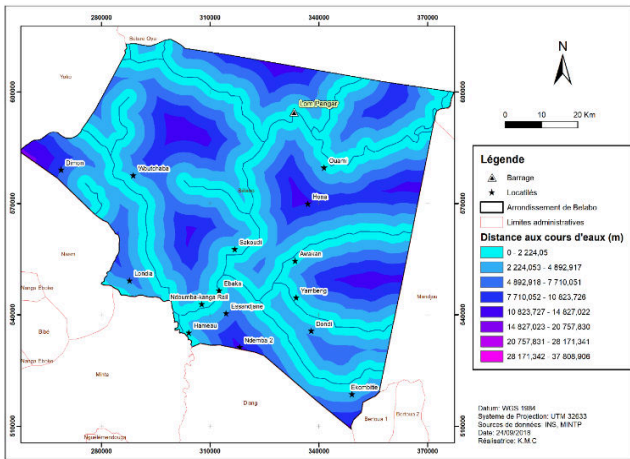


Fig. 8. Distances aux cours d'eau

Fig. 9. Distance aux réseaux routiers

2.4.2 CLASSIFICATION ET STANDARDISATION DES CRITÈRES

Le processus de calcul de l'importance relative de chaque critère est connu sous le terme de « normalisation des critères » [21]. Ainsi, dans une optique de pouvoir intégrer plusieurs facteurs (qualitatif et quantitatif) dans le modèle il convenait de les rendre comparables. Autrement dit, de formuler l'aptitude des différents facteurs sur une échelle commune (modifier les valeurs du pixel de façon à uniformiser les critères en un même nombre de classes) [12]. Une fois les critères d'évaluation identifiés par rapport à la recherche des zones propices à l'implantation des centrales solaires, il s'agissait de déterminer la couche de chaque facteur qui indique le degré d'aptitude de chaque unité de l'espace pour la mise en valeur des ressources [22]. Ces degrés d'aptitude devaient alors être classés en fonction de l'importance relative de la contribution apportée par chacun d'eux pour l'atteinte de l'objectif final [23].

Dans cette étude, les critères ont été standardisés suivant une échelle continue d'aptitude allant de 1 (le moins apte ou le moins important) à 9 (le plus apte ou plus important) [21]. Le tableau 3 présente la catégorisation et la standardisation des différents critères.

Tableau 3. Standardisation des critères

Echelle	Irradiation (watt/m²)	Topographie	Occupation du sol	Humidité (%)
9	174.5-182.49	Très faible	Sol nu	69.83- 75.09
7	169.39-174.5	Faible	Végétation	75.09- 78.805
5	166.48-169.39	Moyen	Zone urbaine	78.0805-81.313
3	164.26-166.48	Fort		81.313- 84.290
1	160.66-164.26	Très fort	Cours d'eau	84.290- 89.367

2.4.3 ANALYSE MULTICRITÈRES HIÉRARCHISÉES

Le choix du poids des critères influence le résultat final. Dans les faits, les facteurs n'ont pas le même coefficient d'importance [10]. Afin de distinguer la potentialité des sites, nous attribuons un poids aux facteurs, pour qu'ils se hiérarchisent du moins favorables au plus favorables [21]. L'Analyse Multicritère ou bien « Analytic Hierarchy Process » (AHP) est une méthode acceptée par la communauté scientifique internationale comme un outil de décision multicritère pour résoudre la question de décision et de pondération [12].

2.4.3.1 PONDÉRATION DES FACTEURS ET MATRICE DE COMPARAISON

Etablie sur la base de l'échelle de Saaty, la pondération se fait en comparant les facteurs et en définissant l'importance de chacun pour les autres. La comparaison par paire au sein de l'AHP peut être effectuée à travers un tableau comme celui du tableau 4. Un diagnostic est typiquement utilisé pour obtenir le rapport degré d'importance de chacun des critères et est basé sur le jugement et la perception des experts [22]. La détermination du degré d'importance s'effectue ainsi en comparant les facteurs et en leur assignant un coefficient de pondération. Ce procédé permet de constituer une matrice appelée matrice de comparaison par paire [21]. Le tableau 4 suivant présente le degré d'importance des facteurs, les uns par rapport aux autres.

Tableau 4. Degré d'importance des facteurs

Facteurs	Irradiation	Occupation du sol	Topographie	Humidité	Température
Irradiation	1	5	5	7	7
Occupation du sol	0.20	1	3	3	3
Topographie	0.20	0.33	1	2	5
Humidité	0.14	0.33	0.50	1	3
Température	0.14	0.33	0.20	0.33	1

Source : Adaptation du tableau de comparaison de Saaty

De ce tableau, la matrice suivante a été déduite :

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 5 & 5 & 7 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0.20 \\ 0.20 \\ 0.14 \\ 0.14 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 & 3 & 3 \\ 0.33 & 1 & 3 & 5 \\ 0.33 & 0.50 & 1 & 2 \\ 0.33 & 0.20 & 0.33 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

La matrice précédente a permis d'obtenir les poids des facteurs impliqués. Ces derniers s'obtiennent en deux étapes. La première consiste à diviser la valeur N_{ij} par la somme des éléments de la colonne j (i et j étant respectivement la ligne et la colonne de la matrice), ce qui donne une nouvelle matrice.

$$M' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0.59 & 0.71 & 0.52 & 0.53 & 0.37 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0.12 \\ 0.12 \\ 0.08 \\ 0.08 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.14 & 0.31 & 0.23 & 0.16 \\ 0.05 & 0.10 & 0.15 & 0.26 \\ 0.05 & 0.05 & 0.08 & 0.16 \\ 0.05 & 0.02 & 0.03 & 0.05 \end{matrix} \end{matrix}$$

Et la seconde étape consiste en la moyenne des lignes de la matrice sachant que la première ligne correspond toujours à l'irradiation, la seconde à l'occupation du sol, la troisième à la topographie, la quatrième à l'humidité et la dernière à la température. Les différents poids obtenus sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Poids des différents facteurs

Facteurs	Poids
Irradiation	0.543
Occupation du sol	0.191
Topographie	0.137
Humidité	0.083
Température	0.046

2.4.3.2 INDICE ET RATIO DE COHÉRENCE

La notion de cohérence dans la comparaison par paires de SAATY (1980) est basée sur le respect de la transitivité du jugement. Ainsi l'indice de cohérence exprimé par l'équation 1 mesure la fiabilité de la comparaison exprimée à des jugements cohérents. Plus l'indice de cohérence est grand, plus les jugements qui ont été exprimés dans la matrice de comparaison seraient incohérents et vice versa [20].

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - N)}{(N-1)} \quad (1)$$

Où N est le nombre d'élément comparé (5 éléments) et λ_{max} est la valeur propre de la matrice de comparaison par paire (5.407). Pour cette étude, l'indice de cohérence a été calculé et estimé à 0.102. De plus Saaty dans son expérience permet de définir le ratio de cohérence comme étant le rapport de l'indice de cohérence calculé sur la matrice correspondant aux jugements des facteurs et de l'Indice Aléatoire (IA) d'une matrice de même dimension. Le ratio de cohérence calculé permet de mesurer la cohérence logique des jugements sur les facteurs [14]. En général, lorsqu'il s'agit de comparer moins de 9 éléments, un seuil de tolérance de 10% est fixé pour cet indice de cohérence [21]. Comme notre étude est basée sur 5 facteurs, l'Indice Aléatoire déterminé dans le tableau plus haut est de 1.12. Ainsi, le ratio est donné par l'équation 2 :

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.091}{1.12} = 0.091 \quad (2)$$

Selon Saaty, si RC est supérieur à 0.1, il y a une incohérence dans les comparaisons par paires et alors, la matrice issue des comparaisons devra être réévaluée [21]. Le ratio de cohérence étant inférieur à 0.1, les jugements ont été considérés comme cohérents.

2.4.4 IDENTIFICATION DES SITES POTENTIELS POUR L'INSTALLATION DES CENTRALES SOLAIRE

L'identification des sites potentiels s'est faite à travers l'agrégation de l'ensemble des critères identifiés. D'après la littérature, les études de Ben Mena et de Bensaid cité par [22] stipulent que la problématique de la détermination des sites correspond à l'agrégation complète ou approche du critère unique de synthèse puisqu'ils considèrent que cette méthode est la seule applicable lorsqu'il y a plusieurs critères qui varient de manière continue dans l'espace. La technique la plus courante et la plus connue pour cette approche est la combinaison linéaire pondérée ou somme pondérée, qui intègre totalement tous les critères considérés en un seul [21]. Elle consiste à multiplier chaque couche facteur par son coefficient de pondération respectif, et ensuite d'additionner ces résultats pour produire un indice d'aptitude [23] (Equation 3).

$$V = \sum a(i) * f(i) \quad (3)$$

V est l'indice d'aptitude ; a est le poids associé au facteur f ; f est le facteur d'indice i. Cette opération a été faite grâce à l'outil « Map algebra » du module « Spatial Analyst » du logiciel Arcgis 10.3.1.

2.4.5 IDENTIFICATION DES SITES FAVORABLES À L'INSTALLATION DES CENTRALES SOLAIRES

[14] présente l'obtention des sites propices comme une combinaison de l'indice d'aptitude et des contraintes. Elle est la résultante de la formule de Saaty présenté à l'équation 4 :

$$S = V * \sum C(i) \quad (4)$$

V est l'indice d'aptitude et C(i) représente les contraintes

La résolution de cette équation s'est aussi faite à l'aide de la calculatrice raster de l'outil « Map algebra » du module « Spatial Analyst » du logiciel Arcgis 10.3.1.

3 RÉSULTATS

3.1 L'INDICE D'APTITUDE

Partant des poids de base résultant de la comparaison par paires, on observe que les facteurs les plus importants pour l'identification des sites propices à l'implantation des centrales solaires dans l'arrondissement de Bélabo sont l'irradiation (54.3%) et l'occupation du sol (19.1%) et la topographie (13.7%). Les autres facteurs (l'humidité à 8.3% et la température du lieu à 4.6%) ont une importance un peu plus faible. A partir de ce qui précède, la carte présentée à la figure 10 montrant les différentes potentialités pour l'implantation d'une centrale solaire photovoltaïque a été produite. Le tableau 6 montre les superficies occupées par chaque classe d'aptitude.

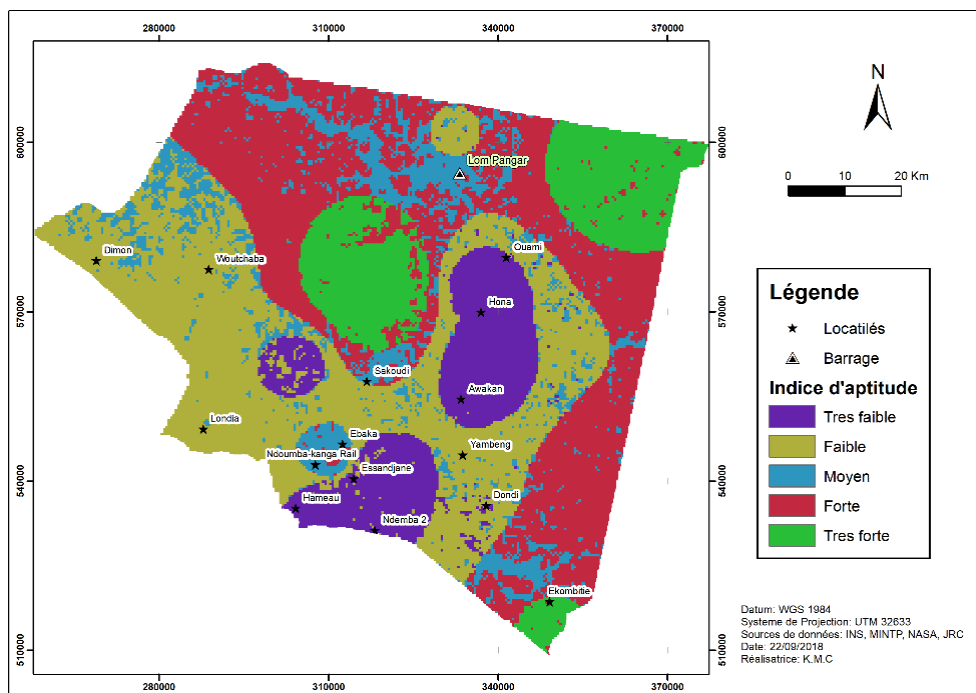


Fig. 10. Indice d'aptitude

Tableau 6. Superficies pour chaque classe d'aptitude

Indice d'aptitude	Superficies (Km ²)
Très faible	804.21
Faible	1819.47
Moyenne	854.16
Forte	1796.4
Très forte	725.73

3.2 SITES PROPICES À L'IMPLANTATION DES CENTRALES SOLAIRES

La carte des indices d'aptitude étant produite, l'obtention de la carte des sites propices à l'implantation des centrales s'est faite grâce à la combinaison avec les contraintes. Bien que Saaty présente une contrainte comme un critère de recevabilité représentant une restriction naturelle ou artificielle, elle permet au mieux de présenter la carte résultante de l'analyse AHP [20]. De ce fait, l'application des contraintes à la carte d'indice d'aptitude, a permis de mettre en évidence les sites propices. La figure 11 présente la carte des sites propices à l'implantation des centrales solaires. Le tableau 7 montre les superficies occupées par chaque classe. La figure 12 présente la répartition du potentiel d'implantation en terme de pourcentage.

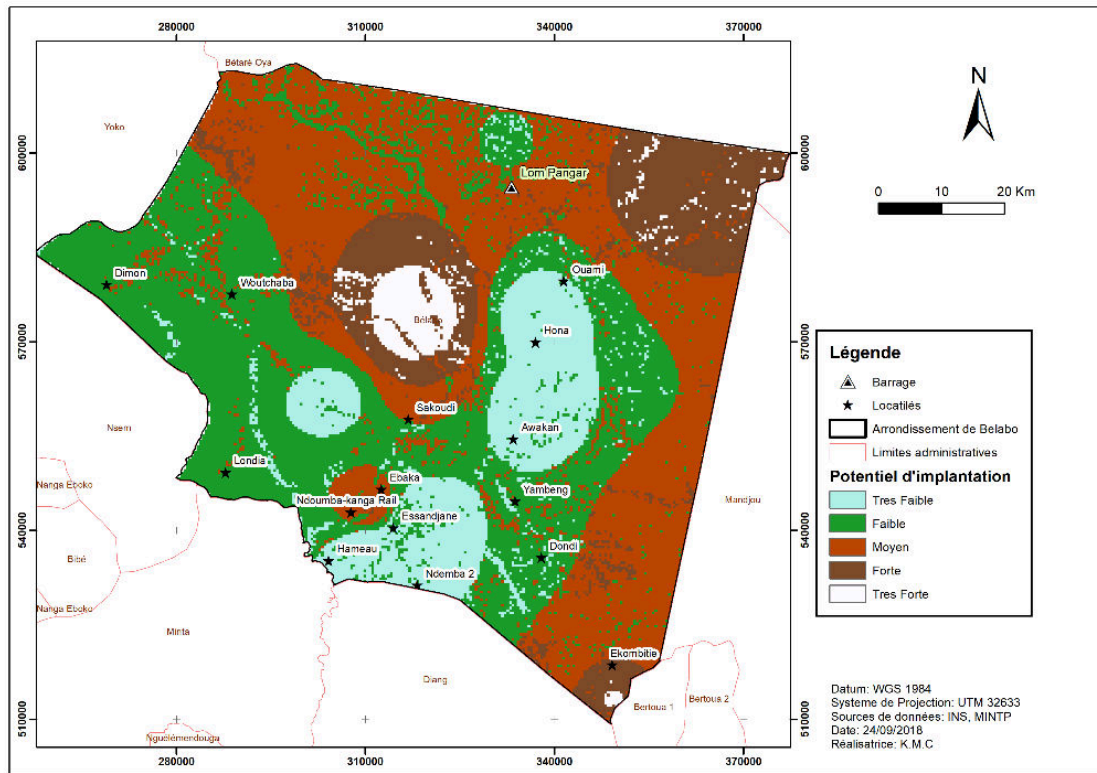


Fig. 11. Potentiel d'implantation de centrale solaire

Tableau 7. Superficie des sites potentiel

Potentiel	Superficies (Km ²)
Très faible	829.48
Faible	1764.6
Moyenne	1945.95
Forte	904.52
Très forte	555.446

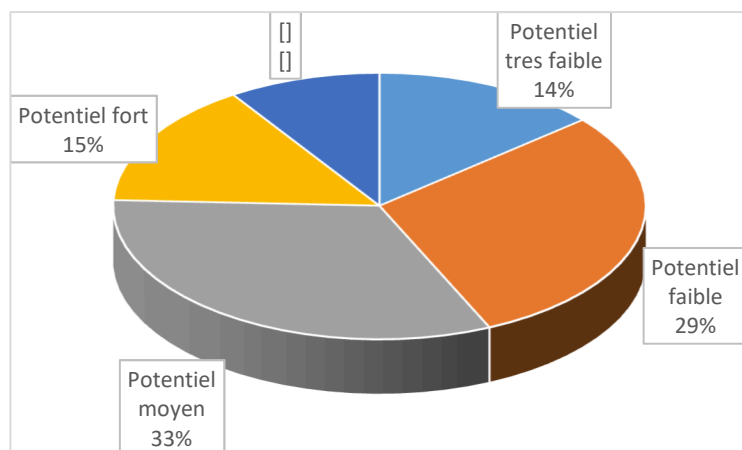


Fig. 12. Répartition du potentiel d'implantation des centrales solaires dans Bélabo

La restriction de cette répartition aux zones à fort potentiel a permis d'extraire les sites où la production serait optimale d'après l'approche multicritère. La carte de la figure 13 montre de façon claire les lieux ayant un potentiel d'implantation élevé. La valeur 1 est admise pour des lieux optimaux et la valeur 0 pour le reste.

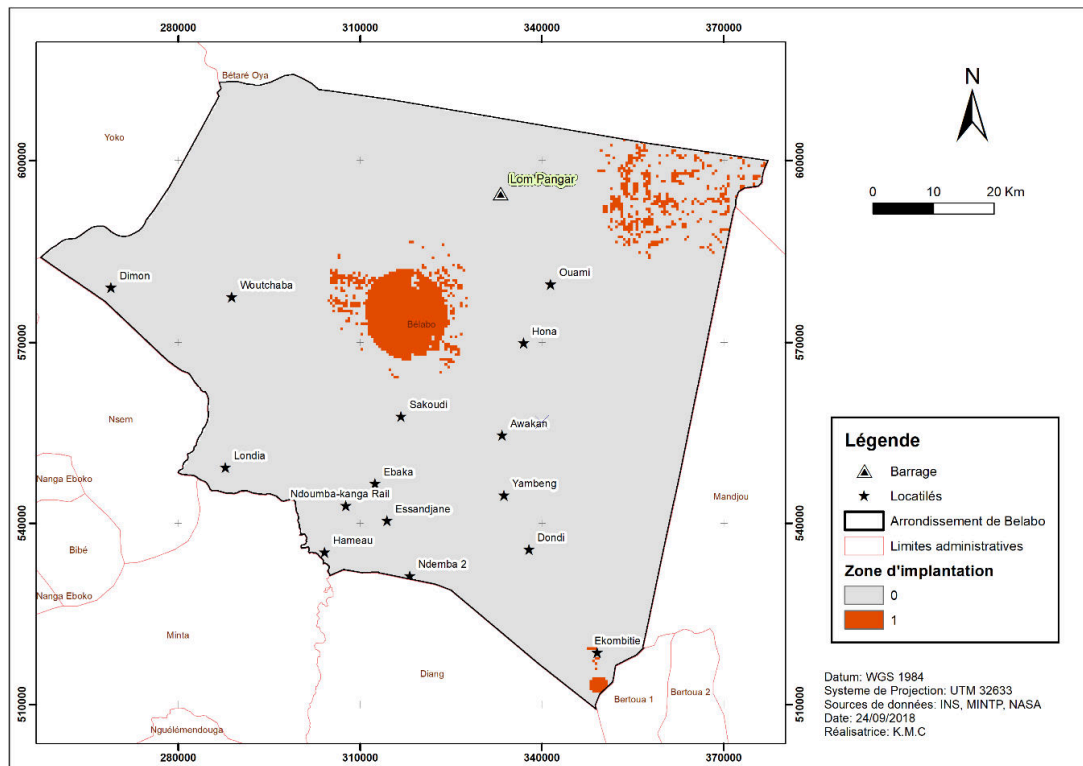


Fig. 13. Lieux optimaux à l'installation d'une centrale solaire photovoltaïque.

4 DISCUSSION

Cette étude à travers ses résultats montre que les SIG couplés à l'analyse multicritères peuvent être un puissant outils d'aide à la décision. Cette étude a permis de délimiter presque automatiquement les zones propices à l'implantation des centrales solaire. Le scénario selon lequel les facteurs ont des importances différentes a été adopté pour cette étude. En fonction de l'analyse multicritères, des poids différents leur ont été attribué. Ainsi les zones propices à l'implantation de ces centrales correspondent principalement aux zones à forte irradiation (174.5-182.49 watt/m²) et à sol nu. En effet, le calcul des poids par l'AHP a révélé que l'ensoleillement à travers son irradiation est évalué par des experts comme le plus important facteur pour la mise en place d'une centrale solaire à 54.3%, puis par l'occupation du sol à 19.1%, la topographie de l'arrondissement à 13.7%, l'humidité à 8.3% et la température du lieu à 4.6%. De plus, le ratio de cohérence calculé dans les comparaisons par paire est de RC = 0,091 (valeur <0,10) indique que le jugement de base est raisonnablement cohérent.

L'approche multicritère de Saarty a permis de montrer que dans l'arrondissement de Bélabo 9% de sa superficie totale est propice à l'installation des centrales solaire pour une production optimale. Ceci peut s'explique par plusieurs raisons : L'inégale répartition des données ayant servies à l'interpolation sur la zone d'étude conduisant aux différentes cartes de facteurs ; La considération de tous les critères comme parfaitement comparables. En effet, selon Joerin la pondération des critères quantitatifs est autant délicate que celles des critères qualitatifs. Toutefois, la technique de standardisation des critères facilite et rend possible leurs combinaisons ; Le manque de certaines données mesurées sur la zone d'étude notamment les données d'heure d'ensoleillement en vue d'apprécier le nombre d'heures pendant lesquelles le soleil est dans le ciel. Ce paramètre représente indirectement la quantité d'énergie reçue [14]

Les limites majeures de cette investigation sont l'accès et la disponibilité des données. La plupart des données incomplètes car elles ont été traitées sur une année. De plus, les stations de mesures sont inexistantes dans la zone de travail. Au niveau des structures de maîtrise d'œuvre, nous étions dans l'incapacité d'avoir accès aux données terrains.

Malgré toutes ces limites, les SIG grâce à leurs capacités d'automatisation des traitements informatiques de données multiples de façon à couvrir une vue d'ensemble et élaborer une étude théorique sans avoir recours à un travail de terrain [12] ont été utilisés dans cette étude. La combinaison de cet outil avec l'approche AMC ajoute une dimension décisionnelle à la planification du projet d'implantation des centrales solaires.

5 CONCLUSION

L'avenir énergétique de la planète doit être basé sur des énergies non polluantes. Il est question de trouver des solutions énergétiques alternatives et durables répondant à la diminution de la consommation des énergies fossiles et surtout des solutions ne participant pas à l'effet de serre. C'est dans cette optique que pour contribuer à l'implantation des centrales solaires par le gouvernement du Cameroun, cette étude a été réalisée. Elle avait pour but de déterminer les sites propices à l'implantation de ces centrales dans l'arrondissement de Bélabo, à l'Est du Cameroun. La technique des SIG combinée à l'approche multicritère de Saarty AHP, a été utilisée dans cette optique. Le choix des critères et de la méthode de pondération a été une étape fondamentale de cette étude ; De plus, c'est en combinant tous ces critères (facteurs et contraintes) que les résultats ont été produits. Ces derniers montrent que 9 % de la superficie totale de l'arrondissement de Bélabo possède un potentiel élevé pour être une zone propice à l'installation des centrales solaires. Toutefois, les contraintes et les facteurs restent modifiables à la faveur des décideurs et des experts. Ainsi la combinaison des SIG et l'analyse multicritères est flexible et peut être appliquée dans différentes régions et pour diverses thématiques (développement de l'énergie renouvelable, risques environnementaux, etc.). Les données d'entrées et le choix du poids des critères sont fondamentaux dans la définition du résultat final. Alors, les facteurs et les critères doivent correspondre le plus possible aux caractéristiques du territoire étudié

REMERCIEMENTS

Les remerciements sont principalement adressés au Ministère de l'Eau et de l'Energie, qui à travers sa Direction du Projet d'électrification par Système Solaire Photovoltaïque de 166 localités (PE 166L), nous a permis de faire la descente de terrain dans la l'arrondissement de Bélabo pour la collecte des données.

RÉFÉRENCES

- [1] Benseddik O, Djaloud F. Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [2] Fojepde. « Atelier météo et énergie » Livret énergie. DGCID, IRD; 2008.
- [3] Global Village Cameroon. Etat des lieux du cadre règlementaire du secteur des énergies renouvelables au Cameroun. 2012.
- [4] Tchatat G. Cameroun - Contribution à la préparation du rapport national pour la formulation du livre blanc régional sur l'accès universel aux services énergétiques intégrant le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. PNUD; 2014.
- [5] Gouvernement camerounais. Document de Stratégie pour la Croissance et l'Emploi 2009.
- [6] Julirex I, Huawei TC. Etude d'Impact Environnemental et Social du Projet d'électrification par système PV. Yaoundé: 2013.
- [7] Chaoubi H, Bougueffa ML. Choix de site optimal pour la production d'hydrogène solaire par approche SIG basée sur l'analyse multicritères : Application région de Ouargla. KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.
- [8] MINEPAT. Plan Communal de Développement de Bélabo 2012:156.
- [9] JRC EC, CM SAF C monitoring. Système d'information géographique photovoltaïque - carte interactive 2018. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr> (accessed August 2, 2018).
- [10] Maingueneau B. Analyse multicritère pour l'implantation d'éoliennes aux îles de la Madeleine. Sherbrooke, 2016.
- [11] Gisement solaire. Anal. Pertes Therm., 2012.
- [12] Zgheib T. Approche multicritère pour l'implantation d'éoliennes au Liban. paris diderot, 2017.
- [13] MINEE. Rapport sur la situation energetique au Cameoun, édition 2015 2015.
- [14] Sadeghi, Karimi. GIS-Based Solar and Wind turbine site selection using multi-criteria analysis: Case study Tehran, Iran. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci 2017;XLII-4/W4:8.
- [15] Koalaga Z. Electricité solaire photovoltaïque 2009.

- [16] Autran J, Roux C. Groupe de travail "Nomenclature urbaine - Occupation du sol grande échelle." Marseille: laboratoire ABC, ENSA-Marseille; CRIGE-PACA; 2008.
- [17] Sanda Gounda H. Cartographie de la dynamique de l'occupation des sols et de l'érosion dans la ville de Niamey et sa peripherie. Memoire Online 2009. https://www.memoireonline.com/01/11/4204/m_Cartographie-de-la-dynamique-de-loccupation-des-sols-et-de-lerosion-dans-la-ville-de-Niamey-e2.html (accessed August 30, 2018).
- [18] Semassou C. Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Benin. Bordeaux 1, 2011.
- [19] Sergies, Nca E. Etude d'impact sur l'environnement de la centrale solaire photovoltaïque au sol. 78, avenue Jacques Coeur CS10000 86 068 POITIERS Cedex9: 2016.
- [20] Mevlut U. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. Renew Sustain Energy Rev 2013:11–7.
- [21] Saaty T. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill. New York: 1980.
- [22] El Amraoui SM, Mohamed R, Mourad B, El Idrissi A. Intégration du SIG et de l'analyse hiérarchique multicritere pour l'aide dans la planification urbaine : étude de cas de la province de Khemisset, Maroc 2017:21.
- [23] Caillet R. Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie 2003:52.