

ANALYSE D'ADEQUATION DU SITE POUR L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES ZONES RURALES DU MALI

Issa Bagayogo, Souleymane Sanogo, Issiaka TRAORE

Laboratoire d'optique de spectroscopie et des sciences atmosphériques (LOSSA), Faculté des Sciences et Techniques, Université des Sciences des Techniques et des Technologies de Bamako.

Correspondant : isbag557@gmail.com

RESUME

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 7 janvier 2024

Reçu en format revisé le: 1^{er} octobre 2024

Accepté le :02 Aout 2025

Mots-Clés :

Analyse, Adéquation, Site, Installation, photovoltaïque, Zones rurales

Keywords

Analysis, Suitability, Site, Installation, photovoltaic, Rural areas

Le Mali, comme beaucoup de pays dans la bande sahélo-saharienne, est confronté à des défis majeurs en matière d'accès à l'électricité, surtout dans les zones rurales. Actuellement au Mali, une grande partie de la population rurale n'a pas d'accès à une source d'énergie fiable, ce qui limite le développement économique et social de ces régions. Les sources d'énergie conventionnelles, comme les centrales électriques au fioul, sont souvent peu adaptées aux zones reculées en raison des coûts élevés de transport et d'infrastructure. Le Mali bénéficie d'un ensoleillement abondant tout au long de l'année, avec des niveaux d'irradiation solaire parmi les plus élevés au monde. Cela fait du solaire photovoltaïque une option prometteuse pour l'électrification rurale. Cependant, pour maximiser l'efficacité des installations, il est essentiel de bien choisir les sites d'implantation. Cette étude est basée sur l'identification de sites appropriés afin d'optimiser la production d'électricité solaire photovoltaïque dans ces sites. La méthodologie utilisée s'articule autour de l'identification des sites optimaux pour l'installation de panneaux solaires photovoltaïques en zones rurales du Mali, en appliquant l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) pour hiérarchiser les critères clés tels que l'abondance des ressources solaires et l'absence de services d'électrification fiable. Les sites potentiels ont ensuite été évalués en utilisant des données SIG des limites administratives des différentes zones rurales, intégrant les besoins en électricité par commune et les données du rayonnement solaire. A partir de ces données et le modèle numérique de terrain de la zone d'étude, nous avons procédé à l'évaluation du potentiel de production d'électricité dans ces sites adaptés à l'installation solaire photovoltaïque. Au terme de cette recherche, il ressort que parmi les 703 communes du Mali, 70 sont desservies par l'EDM-SA, 117 sont desservies par l'AMADER et 81 sont situées sur la ligne électrique Nationale mais n'ayant pas accès à une source d'électricité fiable. En excluant ces communes desservies par les services d'électrification, 435 communes rebondaient aux critères, sont alors jugées appropriées pour l'installation solaire photovoltaïque. Le potentiel théorique de production solaire pour ces communes retenues s'élève à 371183,97 MW, avec une capacité de production d'électricité de 979925,68 MWh. L'implantation de ces centrales solaires va considérablement améliorer l'accès à l'électricité dans ces différentes communes, contribuant ainsi au bien-être des habitants. L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque va contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre, tout en améliorant ainsi la durabilité environnementale de la zone.

ABSTRACT :

Mali, like many countries in the Sahel-Saharan region, faces major challenges in terms of access to electricity, especially in rural areas. Currently in Mali, a large part of the rural population has no access to a reliable source of energy, which limits the economic and social development of these regions. Conventional energy sources, such as oil-fired power stations, are often unsuitable for remote areas because of the high cost of transport and infrastructure. Mali enjoys abundant sunshine throughout the year, with some of the highest levels of solar irradiation in the world. However, to maximise the efficiency of installations, it is essential to choose the right sites. This study is based on the identification of sites to optimise the production of solar photovoltaic electricity. The methodology used revolves around the identification of optimal sites for the installation of solar photovoltaic panels in rural areas of Mali, by applying Hierarchical Process Analysis (HPA) to prioritise key criteria such as the abundance of solar resources and the absence of reliable electrification services. Potential sites were then assessed using GIS data, incorporating electricity requirements by commune and solar radiation. Using this data and the digital terrain model of the study area, we assessed the potential for electricity production at these sites, which are suitable for solar photovoltaic installations. At the end of this research, it emerged that of the 703 communes in Mali, 68 are served by EDM-SA, 254 are served by AMADER and 66 are located on the national power line. Excluding these communes served by electrification services, 435 communes meeting the criteria were deemed suitable for solar photovoltaic installation. The theoretical solar production potential for the communes studied is 371183.97 MW, with an electricity production capacity of 979925.68 MWh. The installation of these solar power plants will considerably improve access to electricity in these various communes, thereby contributing to the well-being of the inhabitants. The use of photovoltaic solar energy will help to reduce greenhouse gas emissions, thereby improving the environmental sustainability of the area.

I. INTRODUCTION :

L'énergie, sous ses multiples formes, constitue indéniablement un pilier essentiel du développement socio-économique et de l'innovation technologique. Qu'il s'agisse de l'énergie nucléaire, des combustibles fossiles, du gaz naturel ou des ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne, solaire, géothermique ou hydraulique, ces différentes sources jouent un rôle central dans les dynamiques de croissance à l'échelle mondiale. Les combustibles fossiles demeurent les principales sources d'énergie à l'échelle mondiale, mais ils sont aussi responsables d'une grande partie des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement climatique. En plus de cet impact environnemental, l'épuisement progressif de ces ressources entraîne une hausse continue des coûts, les rendant de plus en plus inaccessibles pour de nombreuses sociétés. Face à ces enjeux, combinés à la menace du changement climatique, de nombreux pays ont mis en place des stratégies visant à réduire leur dépendance aux combustibles fossiles en favorisant le recours à des énergies alternatives, notamment les énergies renouvelables. Le concept d'énergie renouvelable fait référence à l'énergie qui circule constamment dans l'environnement (Tunc et al., 2019). Parmi les différentes formes d'énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) se distingue grâce à ses multiples avantages (Bakamba dit Djénéba et al., 2023). Conscient de ces défis, le gouvernement du Mali a élaboré plusieurs politiques visant à diversifier les sources d'énergie du pays tout en garantissant un accès à une énergie abordable, fiable et durable. Pour faire face à cette obligation, le gouvernement du Mali a décidé d'élaborer une politique énergétique nationale qui tient compte non seulement de l'évolution des paramètres démographiques et économiques du pays, mais aussi des problématiques environnementales. Une première politique a été écrite en 2006 pour une période de 5 ans, que le Gouvernement entreprend de revoir en 2018, et cette fois avec l'appui financier de ses partenaires techniques et financiers et le concours technique d'un Bureau d'Etude. Cette nouvelle Politique Energétique Nationale (PEN 2018) est élaborée pour orienter et coordonner toutes les interventions dans le secteur, tant des acteurs publics, parapublics que privés et pour servir de cadre de référence pour tous les projets et programmes à mettre en œuvre au Mali. C'est le document de référence qui guide et influence les décisions sur le développement et l'utilisation des ressources énergétiques du Mali, de manière efficace, transparente et durable. La PEN 2018 énonce une vision à long terme, fournit des objectifs de haut niveau et recommande des approches claires et coordonnées pour réaliser cette vision. Elle comprend un ensemble d'orientations stratégiques que les institutions et les partenaires maliens respecteront dans la mise en œuvre des stratégies et des plans d'actions qui seront développés pour la mise en œuvre de cette politique (G. Dekelver et al., 2018), dans le rapport du politique énergétique national 2018. La PEN 2018 encourage le développement

de l'énergie solaire avec un accent particulier sur le photovoltaïque à grande échelle, de façon à réduire les imports d'énergie tout en améliorant la stabilité et en fournissant des sources de support en tension.). Les politiques nationales promouvant les énergies renouvelables sont essentielles pour relever les défis de l'électrification et améliorer le développement économique local (Touré et al., 2019). Ces politiques se traduisent par l'augmentation des centrales solaires photovoltaïques partout à travers le pays. En Afrique subsaharienne, en particulier au Mali, l'évaluation des ressources indique soit l'utilisation d'énergies renouvelables comme l'énergie solaire, soit l'hydroélectricité là où elle est disponible, ou encore des combustibles fossiles (Bhandari, Ba, 2021). Pour maximiser l'efficacité des centrales solaires tout en minimisant les effets négatifs liés à leur installation, il est crucial de choisir soigneusement leurs emplacements. Cependant, la gestion d'un emplacement approprié des systèmes photovoltaïques peut poser de nombreux défis. Le potentiel solaire du Mali est influencé par plusieurs facteurs interdépendants, notamment des aspects géographiques, environnementaux, économiques et technologiques. Il est essentiel de comprendre ces facteurs pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans le pays. En termes de solaire photovoltaïque, le pays a une irradiation solaire de 6 à 7 kWh/m²/j, avec un ensoleillement qui peut atteindre environ 10 heures par jour pendant certaines périodes de l'année (Kaba, 2021). À mesure que la science et la technologie se développent, les possibilités de production directe d'électricité et de chauffage à partir de l'énergie solaire se multiplient (Gulaliyev et al., 2020). Bien que le Mali dispose d'un potentiel solaire important, des défis tels que les emplacements appropriés pour l'installation des panneaux et les facteurs environnementaux doivent être relevés pour exploiter pleinement cette ressource. Malgré l'abondance des ressources solaires, le Mali reste l'un des pays les moins électrifiés au monde. En mettant cette étude, nous visons à mieux comprendre les opportunités et les défis liés à l'approvisionnement en électricité dans ces communes sélectionnées à travers tout le pays, afin d'orienter les décisions politiques et les initiatives de développement visant à améliorer la qualité de vie des habitants de ces communes tout en préservant son écosystème fragile.

L'objectif principal est d'identifier les zones les plus adaptées aux installations solaires photovoltaïques afin d'optimiser la production d'électricité solaire photovoltaïque dans ces zones.

Pour cela nous avons évalué deux facteurs qui influencent l'efficience et l'efficacité de la production d'énergie solaire en milieu rural. Ceux sont les facteurs géographiques et socio-économique. Ces facteurs englobent l'absence ou l'insuffisance d'accès à des sources d'électricité fiables et l'abondance des ressources solaires dans les zones cibles.

II . MATERIEL ET METHODE :

II . 1 . Zone d'étude

Le Mali est un pays enclavé d'Afrique de l'Ouest avec une riche histoire et une diversité culturelle marquée. Il est bordé par l'Algérie au nord, le Niger à l'est, le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire au sud, la Guinée au sud-ouest, et le Sénégal et la Mauritanie à l'ouest. Sa capitale est Bamako, située au sud-ouest du pays. Le pays est situé dans la bande sahélio-saharienne faisant partie d'une alliance dénommée alliance des états du sahel avec une superficie de 1 240 192 km². La zone d'étude concerne les localités identifiées et jugées appropriées pour l'installation solaire PV, reparties de part et d'autre sur tout le territoire. L'étude concerne au total 435 localités jugées étant appropriées pour les installations solaires photovoltaïques. La figure N°1 représente la localisation géographique et administrative des localités concernées.

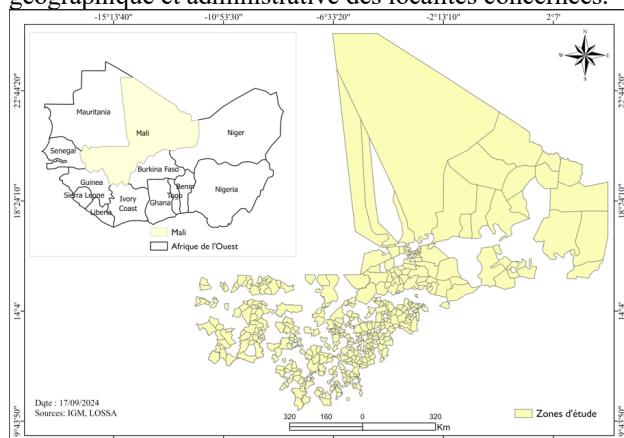


FIGURE 1: Zone d'étude indiquant les communes sélectionnées du Mali

II. 2. Données et Matériels

a-Matériels:

Les logiciels:

PVSyst: Logiciel utilisé en modélisation photovoltaïque. Il donne un accès à la base de données à partir des traitements d'images du satellite Meteosat second Generation. Il a donc été utilisé, dans le cadre de cette recherche pour le traitement des images satellites des différentes communes concernées.

Microsoft office: Suite bureautique propriétaire de la société.

Excel: Utilisé pour organiser, analyser, visualiser et manipuler des données grâce à ses fonctionnalités de feuilles de calcul, de formules et de graphiques.

PVGIS: Logiciel utilisé en modélisation photovoltaïque. Il donne un accès à la base de données construit à partir des traitements d'images satellites.

ArcGIS 10.3 –et *QGIS 3.23.3*: 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 l'analyse spatiale.

Ces appareils et logiciel nous ont permis de générer les informations nécessaires dans ces communes permettant d'analyser les données et générer des cartes.

b-Données:

Afin d'évaluer le potentiel de production d'électricité solaire dans les différentes Communes retenues, les données du besoin d'électricité, les données in-situ de l'ensoleillement, de l'intensité du rayonnement solaire de Global Solar Atlas et du nombre d'heures d'ensoleillement de Deutsche Wetterdienst (Service météorologique allemand ; DWD ; www.dwd.de), que cette institution a collectée auprès des services météorologiques nationaux relevant de ces localités du pays ont été utilisées.

Tableau 1: Données utilisées

Données	Types	Sources
Limites administratives des communes du Mali	Vecteur	Base de données de l'Institut Géographique du Mali (IGM)
Données du besoin d'électricité	statistique	Les données INSAT sur l'électrification obtenues à l'aide des rapports sur la consommation d'électricité de la banque mondiale, en milieu rural dans la bande sahélio-saharienne de l'Afrique de l'Ouest
Potentiel de l'irradiation solaire	raster	Global Solar GIS
Occupation du sol	raster	Provient du traitement des images satellites du satellite Landsat lancé par la NASA
Ensoleillement	in-situ	Station services météorologiques nationaux
Irradiance	satellite	Provient du base de données satellite de la NASA
Nombre d'heures ensoleillement	raster	Base de données satellite du Service météorologique allemand ; DWD ; www.dwd.de

II. 3 . Approche méthodologique:

L'approche méthodologique utilisée dans cette étude est faite de façon qualitative en application le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) et quantitative en utilisant les données des ressources solaires. Le Processus d'Analyse Hiérarchique est une méthode structurée qui permet de prendre en compte plusieurs critères dans la sélection des sites pour l'installation solaire Photovoltaïque, en s'appuyant sur l'expertise locale (qualitative) et des évaluations quantitatives. Pour cela, Toutes les 703 Communes du Mali ont été concernées par cette étude en appliquant Analytic Hierarchy process (AHP) pour choisir les emplacements les plus appropriés pour l'installation solaire Photovoltaïque.

Analyse qualitative:

L'analyse qualitative constitue à identifier toutes les communes qui sont hors réseau de couverture. Pour cela

nous avons procédé à la recherche de sites qui ne sont pas sur les zones de couverture de services énergétiques dont l'énergie du Mali (EDM-SA) et l'Agence Malienne pour le développement de l'Energie Domestique et de l'Electrification Rurale (AMADER), ni traversés par la ligne électrique Nationale. Pour maximiser l'efficacité des centrales tout en minimisant les effets négatifs liés à leur installation, il est crucial de choisir soigneusement leurs emplacements. Dans le cadre de cette étude, nous avons examiné les projets antérieurs et les études similaires pour dégager les critères afin de choisir les sites appropriés pour l'installation de centrales solaires. En utilisant la méthode Analytique Hiérarchique des Processus (AHP), parmi plusieurs méthodes d'Analyse Multicritère de décision, nous avons évalué l'importance de chaque facteur. Les critères de sélection sont indiqués ci-dessous (tableau2).

Tableau 2: Critères de sélection

Sites	Location	Couverts Par EDM-SA	Couverts Par AMADER	National Electrical	Status
1	Sites A	Oui	Non	Oui	Couvert
2	Sites B	Non	Oui	Non	Couvert
3	Sites C	Oui	Oui	Oui	Couvert
4	Sites D	Non	Non	Oui	En Cours de raccordement
5	Sites E	Non	Non	Non	Hors réseau

Le site E a été sélectionné pour l'installation solaire photovoltaïque en raison de son statut "réseau", indiquant une absence de couverture par EDM-SA, AMADER. Les autres sites (A, B, C, D et D) sont déjà couverts par au moins un des services énergétiques nationaux, justifiant ainsi la préférence pour le site E. Les critères de sélection sont adaptés à partir des directives de données pour le potentiel de génération d'énergie renouvelable et des cartes d'emplacement suivies par l'EPA (Agence de Protection de l'Environnement). Les communes constituées par le site E ont été retenues pour la deuxième pour la deuxième étape. Une analyse de superposition raster, par le dépistage de chacun des facteurs à l'aide d'Arcgis, a permis de fournir les informations nécessaires.

Analyse Quantitative :

La deuxième étape constitue à évaluer le potentiel de ressources solaires disponibles pour la production d'électricité dans les communes retenues par la première étape. Pour cela nous avons procédé à une l'évaluation théorique.

L'évaluation théorique est élaborée sous deux angles, d'une part elle consiste à déterminer le potentiel solaire pouvant couvrir le besoin des communes, d'autre part le potentiel disponible dans ces endroits. Cela a permis de

savoir éventuellement de quoi les ressources disponibles peuvent combler l'objectif de l'étude.

Evaluation moyenne mensuelle-Evaluation moyenne annuelle de l'ensoleillement:

Dans cette étude, nous avons utilisé les données IN-SITU sur l'ensoleillement, ces données ont été collectées auprès des stations météorologiques de huit régions administratives de l'ancienne découpage du pays. Bien que l'obtention de données IN-SITU pour chaque municipalité (commune) améliorerait la fiabilité de nos résultats, plusieurs défis ont entravé cette approche. Plus précisément, l'absence de données IN-SITU disponibles dans certaines communes, associée aux coûts élevés de la récolte des données sur place pour chaque communes ont constitué des obstacles importants. Pour remédier à ces limites, nous avons choisi d'utiliser les données d'une station météorologique comme source représentative pour toutes les communes de la région concernée.

- Ensoleillement moyenne:

Nous avons calculé les moyennes mensuelle et annuelle de l'ensoleillement de 1er janvier 2011 au 31 décembre 2020 par les formules:

$$\text{Moy mensuelle} = \frac{\sum_{2011}^{2020} \text{mensuelle} (\text{mème mois de l'année})}{10}$$

La moyenne annuelle de l'ensoleillement de 1er janvier 2011 au 31 décembre 2020 est donnée par la formule:

$$\text{Moy annuelle} = \frac{\sum \text{moy mensuelle}}{12}$$

Ainsi la même formule nous a permis de trouver le nombre d'heures d'ensoleillement sur la période de dix ans du 1er janvier 2009 au 31 décembre 2018. Ces données proviennent de la base de données satellitaire du Service météorologique allemand; DWD ; www.dwd.de

Quant aux données de l'irradiation solaire, les bases de données satellitaires Global solarGIS ont été exploitées dans ce sens que, « depuis les années 1960, les satellites météorologiques sont devenus un des instruments privilégiés de l'étude de l'atmosphère (Susanti Tasri et al., 2022).

A partir de ces données et le modèle numérique de terrain de la zone d'étude, l'outil Solar radiation d'ArcGIS a permis de modéliser de l'ensoleillement (figure2) et l'irradiation solaire (figure3).

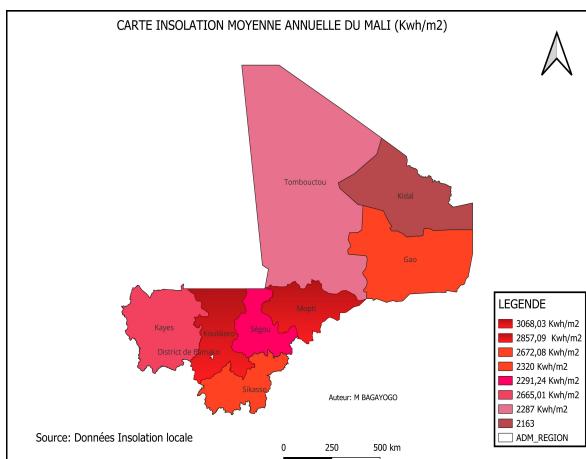


Figure 1: Carte de l'ensoleillement moyen annuel (2010-2020) pour les huit régions administratives.

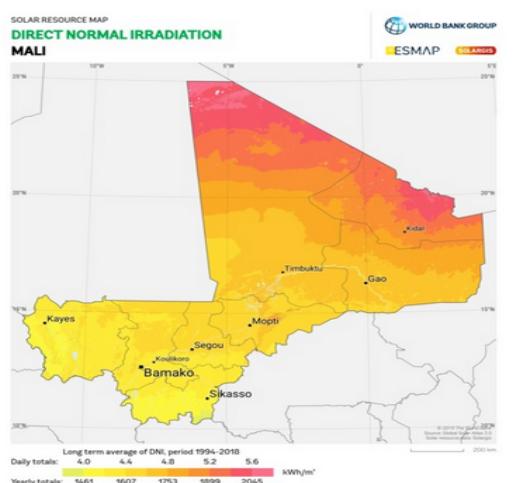


Figure 3-a: Irradiation normale directe

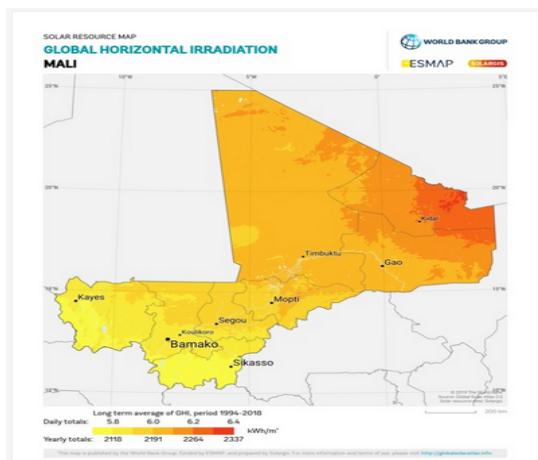


Figure 3-b : Irradiation Globale Horizontale

• Potentiel de production solaire :

Diverses méthodes sont utilisées pour évaluer le potentiel de production d'électricité solaire photovoltaïque. Le potentiel de ressources de l'énergie solaire dans n'importe quelle zone spécifique est la quantité d'énergie générée par le rayonnement solaire dans cette zone géographique. Ce volume est mesuré en kilowattheure (kWh). Cependant, pour évaluer la production d'électricité

solaire photovoltaïque pour une période donnée, les données, du besoin d'électricité par commune, du rayonnement solaire et les données SIG pour les surfaces utiles pour l'installation ont été utilisées dans cette étude.

Pour évaluer le besoin en électricité dans les zones concernées, les données INSAT sur l'électrification sont plus fiables. Ces données sont obtenues à travers le rapport sur la consommation d'électricité de la banque mondiale, en milieu rural dans la bande sahélienne de l'Afrique de l'Ouest.

Le besoin B_t — en électricité par commune, égale à la consommation d'électricité annuelle d'un seul habitant, soit 116 KWh au Mali, multiplié par le nombre d'habitants par commune (rapport sur la consommation d'électricité de la banque mondiale en milieu rural dans la bande sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, 2021)

$$B_t = B_t J_t \cdot P_t \quad (\text{Ebhota \& Tabakov, 2022}) \quad \text{Où :}$$

B_t — Besoin d'électricité par commune

$B_t J_t$ — consommation d'électricité journalière par personne

P_t — population totale par commune

A partir de ces données et le modèle numérique de terrain de la zone d'étude, nous avons procédé aux diverses évaluations suivantes :

• La Surface exploitable:

La surface exploitable pour les installations solaires PV de n'importe quelle zone spécifique exprimée en mètre carré est la surface réservée au champ solaire de cette zone. Théoriquement la surface de l'installation par les différentes communes concernées peut être exprimée comme suit :

$$S_p = B_t / I_S \quad (\text{Shepovalova et al., 2023}),$$

ou :

S_p : Surface exploitable de l'installation solaire de la commune

B_t : Besoin en électricité de la commune concernée dans la zone d'étude (en kWh)

I_S : Intensité de l'irradiation solaire de la commune concernée dans la zone d'étude (en kWh/m²)

Nous avons déterminé le potentiel solaire de l'installation prévue pour couvrir le besoin à l'aide de la formule théorique :

$$RPge = S * Hr * Ts \quad (\text{Gulaliyev et al., 2020}), \text{ ou}$$

$RPge$ — potentiel solaire théorique de ressources naturelles

S — surface exploitable de l'installation

Hr — la moyenne mensuelle de l'intensité du rayonnement solaire par (MW/km²)

Ts — le nombre d'heures d'ensoleillement par commune au cours de l'année.

Nous avons ensuite déterminé la quantité d'énergie solaire photovoltaïque produite par la technologie PV par commune concernée est évaluée comme suit par la formule:

$$EA = AP V * HR * \eta P * (1 - \lambda p) * (1 - \lambda C) \quad (\text{Gulaliyev et al., 2020})$$

EA — est la capacité de production annuelle du système PV (en kWh/an)

$AP V$ — la surface exploitable de l'installation concernée (en m^2)

HR — la moyenne annuelle du rayonnement solaire sur la période de 10 ans (en kWh/m^2)

ηP — Efficacité des modules

λp — perte du module par diverses causes (10 %),

λC — pertes dues au refroidissement des batteries PV (5%).

III RÉSULTATS :

III .1 . Analyse qualitative pour l'identification des communes en dehors du réseau de couverture

Plusieurs facteurs sont pris en compte lors de la mise en place d'un projet de sélection de sites appropriés qui contribuent à l'efficacité et au rendement de la production d'énergie solaire. La bande sahélio-saharienne en général et le Mali en particulier bénéficient d'un rayonnement solaire important. Pour atteindre nos objectifs, nous nous sommes appuyés sur deux critères essentiels de base socio-économique et environnemental: à savoir l'inaccessibilité des services d'électrification et l'abondance des ressources solaires. Par conséquent, le facteur le plus important à considérer dans nos critères de sélection a été l'inaccessibilité des sites aux services nationaux d'électrification étant donné que toute la zone d'étude possède un important de ressources solaires (ensoleillement) pour la production d'électricité. Les résultats de l'analyse qualitative ont identifié les sites les plus appropriés pour l'installation de panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit des sites situés dans des zones non couvertes par les services nationaux d'électrification, à savoir EDM-SA et AMADER. Les résultats ont permis d'identifier les zones couvertes et les zones non couvertes par ces services d'électrification. Les localités qui répondent aux normes d'installation des centrales solaires sont sélectionnées sur la base de différents critères de sélection. A la lumière de ces critères, il ressort que sur les 703 communes du Mali, 70 sont desservies par EDM-SA (figure4-a), 117 sont desservies par AMADER (figure5) et 81 communes sont traversées par la ligne électrique nationale (figure4-b). Au total, 435 communes ou localités n'ont pas d'accès fiable à l'électricité. Compte tenu des critères de sélection des sites pour les installations solaires photovoltaïques, à savoir l'abondance des ressources solaires et l'inaccessibilité des sites aux services d'électrification, ces communes sont jugées aptes à l'installation de centrales solaires (Figure 6).

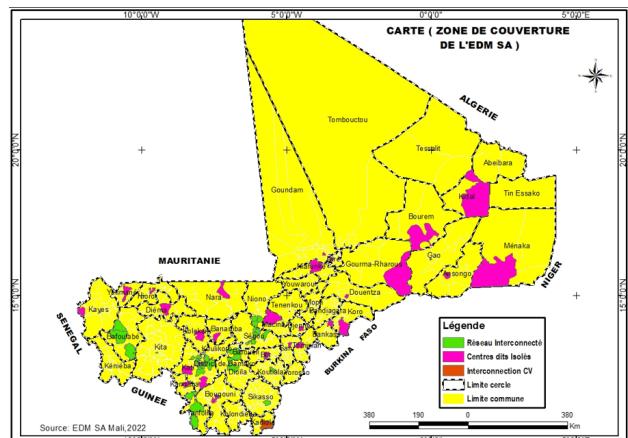


Figure4-a : Zones desservies par le réseau électrique d'EDM-SA

En vert, les communes couvertes par le réseau interconnecté de l'EDM concentrées au sud tandis que en violet les communes non couvertes par les services d'électrification de plus en plus concentrées au nord (figure2-a).

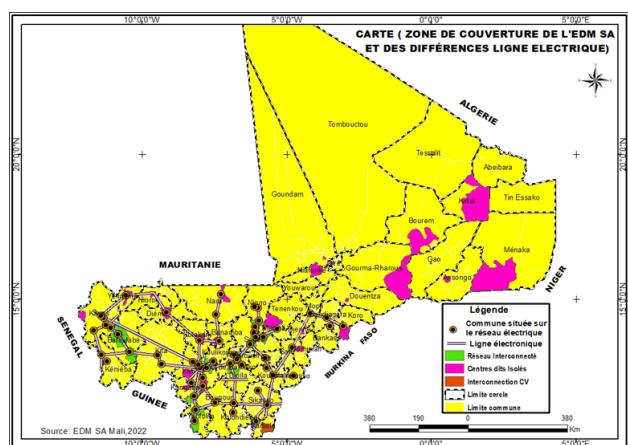


Figure4-b : Zones traversées par le réseau de transport électrique national.

En vert, les réseaux interconnectés de l'EDM-SA concentrés au sud et en violet les centres isolés de l'EDM-SA de plus en plus concentrés au nord (figure2-b). Les localités représentées par les diagrammes circulaires sont celles traversées par la ligne électrique nationale mais non aucun accès à l'électricité.

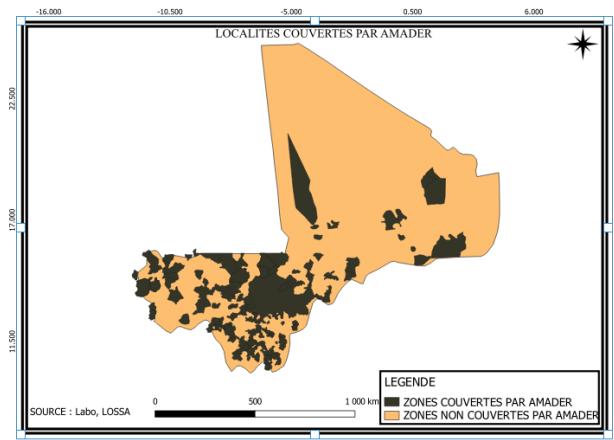


Figure 5 : Répartition géographique des localités desservies par AMADER

En Noir, zones couvertes par l'AMADER de plus en plus concentrées au sud et en orange abricot, les zones inaccessibles au service d'électrification nation de plus en plus concentrées au nord.

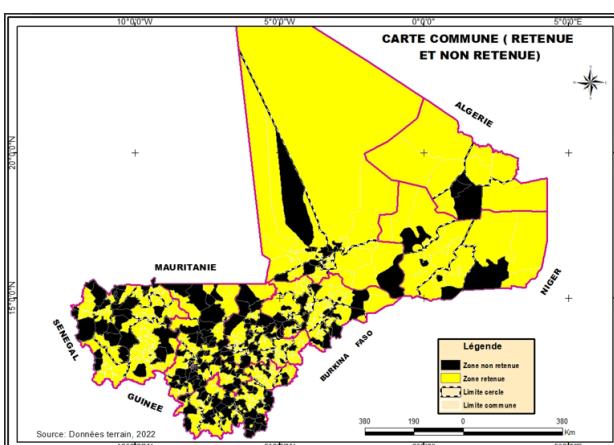


Figure 6 : Emplacements appropriés pour l'installation de systèmes photovoltaïques

Dans la figure 4, les municipalités (communes) sélectionnées pour des installations solaires photovoltaïques sont surlignées en jaune et de plus en plus concentrées au nord par rapport au Sud. Ces communes sont des sites potentiels pour des installations solaires photovoltaïques pour autant qu'elles répondent aux critères de sélection. Au total 435 communes réparties de part et d'autres à travers tout le territoire n'ont aucun accès à une fiable d'électricité. Au regard des critères de choix pour la sélection des sites pour l'installation solaire photovoltaïque qui sont l'abondance des ressources solaires et l'inaccessibilité des sites aux services d'électrification, ces communes sont alors jugées appropriés pour l'installation des centrales solaires.

A. Analyse quantitative

. Évaluation du potentiel de la zone pour les installations photovoltaïques

Au Mali, la consommation d'énergie et la production d'électricité n'ont jamais été équilibrées en raison de la croissance rapide de la population et la dépendance à deux source d'énergie : l'hydroélectricité et le thermique. Pour surmonter ces défis, l'évaluation du potentiel solaire de l'installation prévue pour chacune des communes est une étape importante dans la mise en place d'un projet solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire d'une zone est proportionnel au nombre d'heure d'heure d'ensoleillement et l'intensité de l'irradiation solaire de la zone (figure N°7). Quant aux potentiel de production d'électricité, elle est proportionnel à : la capacité de production solaire par endroit, l'intensité de rayonnement solaire, l'efficacité des modules et aux différentes pertes du système. La figure N°8 représente le potentiel de production d'électricité par endroit.

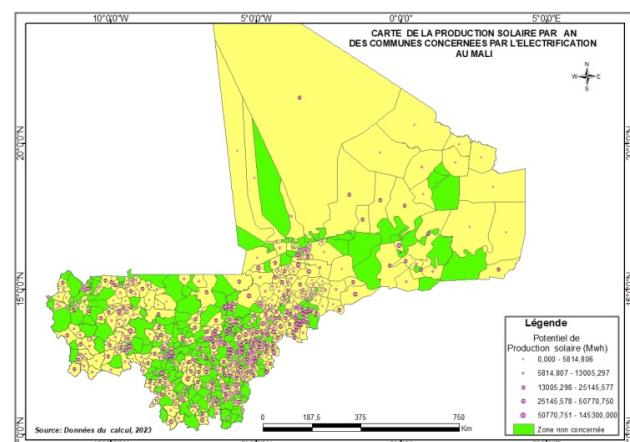


Figure 7 : Potentiel de production solaire dans les zones rurales pour l'installation de systèmes photovoltaïques

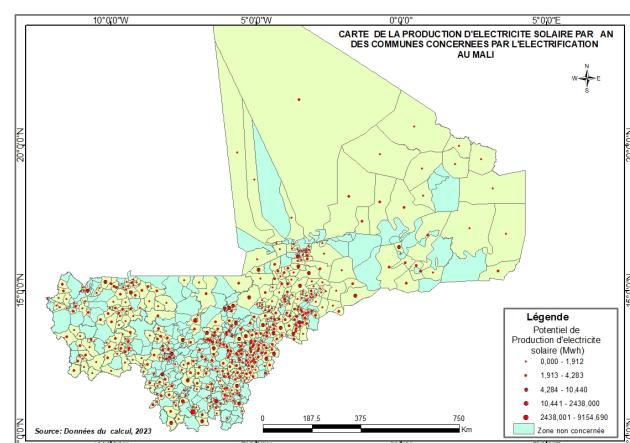


Figure 8 : Carte du potentiel de production d'électricité solaire pour l'installation de systèmes photovoltaïques

L'évaluation du potentiel de production d'électricité pour les communes sélectionnées a montré qu'à travers l'énergie solaire, le Mali peut produire une quantité

d'électricité très considérable. Les communes situées dans les zones colorées en gris mastic présentent un potentiel de production solaire PV allant de 1,912Mwh à 9154, 690MWc. Les communes avec le plus fort potentiel de production solaire PV sont situées de part et d'autre sur tout le territoire; ce potentiel est de plus élevés au sud.

IV. DISCUSSION

Pour l'identification des sites appropriés, le processus hiérarchique analytique (AHP) a été utilisée pour évaluer l'aptitude du site à accueillir des installations photovoltaïques. La méthodologie utilisée a pris en compte des facteurs tels que l'abondance des ressources solaires (ensoleillement, irradiation horizontale globale, etc.) et l'inaccessibilité des services d'électrification nationaux. La méthodologie utilisée ici met en évidence les défis posés par l'inaccessibilité à des services d'électrification fiables, qui peuvent entraver l'efficacité de la collecte et de l'analyse des données. Une méthodologie similaire utilisée par Wilson et Camile, dans l'étude intitulée « Identification des sites favorables à l'installation de centrales solaires photovoltaïques à l'aide de l'analyse multicritère et du SIG : le cas du district de Bélabo, Cameroun »(Wilson & Camille, 2019) est cohérente avec la présente étude. Leur travail a pris en compte des facteurs tels que l'abondance des ressources solaires, sociaux-économiques, mais aussi la topographie, l'humidité et la température. En outre, une étude réalisée par Tunc et al. et intitulée « GIS-based site selection for solar power plants using the hierarchical analytical process (HAP) in Istanbul, Turkey »(Tunc et al., 2019), a utilisé l'approche AHP pour pondérer les différents critères et les classer par ordre de priorité en fonction de leur adéquation avec les objectifs du projet. Les résultats ont ensuite été cartographiés à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) afin de faciliter la sélection du site optimal pour l'installation de centrales solaires à Istanbul. Afin de déterminer le potentiel de production d'électricité solaire photovoltaïque dans notre contexte, une évaluation théorique théorique du potentiel solaire a été réalisée, permettant d'évaluer le potentiel de production d'électricité dans les communes rurales concernées. Une étude similaire a été réalisée par Poneabo et Tchawa, cette fois au Cameroun, sur « l'évaluation du potentiel solaire photovoltaïque dans le Littoral Sud-Camerounais(Poneabo & Tchawa, 2022) a utilisé la même méthode à savoir l'évaluation théorique du potentiel solaire. Elle a permis d'évaluer le potentiel théorique et technique du Littoral Sud-Camerounais. En revanche, d'autres méthodes différentes sont utilisées pour évaluer le potentiel de production des ressources solaires photovoltaïques, comme dans le cas de l'étude éthiopienne « Feasibility and Assessment of Solar Resource Potential : A Case Study in the North Shewa Zone, Amhara, Ethiopia » (Faisabilité et évaluation du potentiel des ressources solaires : une étude de cas dans la zone de North Shewa, Amhara, Ethiopie)(Feleke et al., 2023) qui utilise des techniques de modélisation avancées grâce aux logiciels HOMER (hybrid optimisation of multiple renewable energies) et Malab. Cette approche permet une analyse complète des différentes sources

d'énergie renouvelable, en optimisant leur intégration et en évaluant leur faisabilité sur la base de nombreuses données météorologiques recueillies auprès de la NASA et des centres météorologiques locaux. En résumé, les deux méthodes d'évaluation fournissent des méthodologies précieuses dans le domaine de l'évaluation de l'énergie solaire, adaptées à leurs contextes respectifs. L'utilisation de techniques de modélisation avancées par l'étude éthiopienne contraste avec l'accent mis par notre étude sur les facteurs liés aux ressources solaires, à l'utilisation des terres et aux problèmes d'accessibilité, soulignant les différentes approches nécessaires pour relever les défis de l'énergie solaire dans les différentes communes. Ensemble, ils soulignent l'importance de méthodologies spécifiques au contexte pour optimiser l'utilisation des ressources solaires et relever les défis uniques auxquels sont confrontées les communautés en Éthiopie et au Mali. Cette étude s'est concentrée sur des facteurs tels que l'abondance des ressources solaires enregistrées (l'intensité de l'irradiation solaire), les surfaces exploitables et l'efficacité des systèmes solaires afin d'évaluer le potentiel théorique d'installation de centrales électriques. Les mêmes facteurs ont été pris en compte dans une étude similaire de Gulaliyev et al. sur « l'évaluation du potentiel d'énergie solaire et de son efficacité écologique et économique : le cas de l'Azerbaïdjan »(Gulaliyev et al., 2020), qui mentionne que le potentiel théorique peut être exprimé, probablement au moyen d'une formule ou d'un modèle mathématique. Cela indique une étape de modélisation, où les paramètres pertinents sont pris en compte, tels que les ressources solaires et la surface adaptée à l'installation de panneaux, afin d'estimer le potentiel solaires dans les emplacement les plus appropriés à l'installation photovoltaïque .

V. CONCLUSION

Ce travail de recherche offre une base solide pour la planification et la mise en œuvre de projets d'énergie solaire qui auront un impact positif sur la vie des communautés rurales et éloignées. Elle démontre également la nécessité de combiner des approches multidisciplinaires pour une électrification équitable, en tenant compte des facteurs sociaux, économiques et environnementaux.

Cette étude a permis d'identifier les endroits où les communes appropriées pour l'implantation des centrales solaires photovoltaïques à travers tout le territoire national. L'implantation de centrales solaires dans les communes rurales et urbaines du Mali, vise à résoudre le problème de l'accès limité à l'électricité dans ces communes, caractérisées par un fort ensoleillement. En fin de compte, notre recherche contribue à l'atteinte des objectifs de développement durable en améliorant l'accès à l'énergie propre et abordable pour ceux qui en ont le plus besoin. Elle ouvre la voie à un avenir plus durable et inclusif, où l'électricité devient un catalyseur de progrès économique et social pour les communautés mal desservies.

Acknowledgement:

This study was fully supported by the International Science Programme (ISP/IPPS) through its founded research group MAL01 for providing workspace and data for this study.

REFERENCES :

- 05_Bernhard_Thierry_v4_Public.pdf. (s. d.).
- Bakamba dit Djénèba et al. (2023). Performance Evaluation of an Installed On-Grid Photovoltaic System at Bamako. *American journal of electrical power and energy systems*. <https://doi.org/10.11648/j.epes.20231201.12>
- Bhandari,Ba, R., Abdramane. (2021). Rural Electrification Pathways : An Implementation of LEAP and GIS Tools in Mali. *Energies*, 14(11), 3338. <https://doi.org/10.3390/EN1411338>
- Ebhota, W. S., & Tabakov, P. Y. (2022). Assessment and performance analysis of roof-mounted crystalline stand-alone photovoltaic (SAPV) system at selected sites in South Africa. *Bulletin of the National Research Centre*, 46(1), 236. <https://doi.org/10.1186/s42269-022-00929-3>
- Feleke, S., Anteneh, D., Pydi, B., Satish, R., El-Shahat, A., & Abdelaziz, A. Y. (2023). Feasibility and Potential Assessment of Solar Resources : A Case Study in North Shewa Zone, Amhara, Ethiopia. *Energies*, 16(6), 2681. <https://doi.org/10.3390/en16062681>
- G. Dekelver et al. (2018). *Politique Energétique Nationale V provi* (No. 00 2018 04 03).
- Gulaliyev, M. G., Mustafayev, E. R., & Mehdiyeva, G. Y. (2020). Assessment of Solar Energy Potential and Its Ecological-Economic Efficiency : Azerbaijan Case. *Sustainability*, 12(3), 1116. <https://doi.org/10.3390/su12031116>
- Kaba, M. (2021). *RAPPORT sur L'analyse rapide de l'environnement propice et l'évaluation du modèle fress.*
- Poneabo, L. K., & Tchawa, P. (2022). *LE POTENTIEL SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DU LITTORAL SUD-CAMEROUNAIS. I(2).*
- Shepovalova, O., Arbuzov, Y., Evdokimov, V., Ilyushin, P., & Suslov, K. (2023). *Assessment of the Gross, Technical and Economic Potential of Region's Solar Energy for Photovoltaic Energetics.*
- Susanti Tasri, E., Karimi, K., Muslim, I., & Dwianda, Y. (2022). The influence of economic growth, energy consumption, poverty and population on Indonesia's environmental quality index. *KnE Social Sciences*. <https://doi.org/10.18502/kss.v7i6.10634>
- Tunc, A., Tuncay, G., Alacakanat, Z., & Sevimli, F. S. (2019a). *GIS BASED SOLAR POWER PLANTS SITE SELECTION USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) IN ISTANBUL, TURKEY.* *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 1353-1360. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1353-2019>
- Tunc, A., Tuncay, G., Alacakanat, Z., & Sevimli, F. S. (2019b). *GIS BASED SOLAR POWER PLANTS SITE SELECTION USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) IN ISTANBUL, TURKEY.*
- Wilson, T. N. E., & Camille, K. M. (2019). *Identification des sites favorables à l'installations des centrales solaires photovoltaïques à l'aide de l'analyse multicritères et des SIG : Cas de l'arrondissement de Bélabo, Cameroun.* 26(938-952).