

Analyse Multivariée Et Typologie Spatiale Du Potentiel Photovoltaïque Dans La Région Boeny (Madagascar) : Classification Des Territoires Et Caractérisation Des Sites Candidats

RAHAMALITSIROFO Haja¹, ANDRIANOMANANA RANAIVO DANIEL Mamitiana², RAKOTOSON Tolontsoa^{1,3}, TOVONIRINA Jackie⁴, RASOLOMANANA Eddy H.⁵

^{1,2,3,4,5}Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo

Corresponding Author : RAHAMALITSIROFO Haja



Résumé: Cette étude analyse la structuration spatiale du potentiel photovoltaïque dans la région Boeny (Madagascar) à partir d'une approche multivariée combinant irradiation globale horizontale, pente, altitude et orientation du relief. Une classification non supervisée par K-means distingue quatre groupes représentant respectivement 24,8 %, 38,3 %, 18,4 % et 18,5 % des cellules analysées, révélant plusieurs configurations solaire-topographiques. L'analyse en composantes principales confirme cette organisation : les deux premiers axes expliquent 100 % de la variance, dont 68,3 % pour PC1 et 31,7 % pour PC2, principalement structurés par le couple GHI-altitude et la pente. Le GHI moyen régional atteint 5,990 kWh/m²/jour, avec un écart-type de 0,092 kWh/m²/jour ; sa distribution présente une asymétrie modérément négative (-0,434) et une kurtosis excédentaire de -0,320. Dix sites candidats ont ensuite été présélectionnés selon un GHI supérieur ou égal au 75e percentile, une pente $\leq 5^\circ$ et une superficie continue ≥ 20 ha. Parmi eux, S01 présente le profil relatif le plus favorable, combinant superficie et GHI normalisés proches de 1,00 et une aptitude de pente d'environ 0,64. Ces résultats fournissent une base robuste pour hiérarchiser les secteurs prioritaires avant analyse de faisabilité détaillée.

Mots-clés : potentiel photovoltaïque ; analyse multivariée ; K-means ; analyse en composantes principales ; Boeny.

Abstract: This study analyzes the spatial structure of photovoltaic potential in the Boeny Region (Madagascar) using a multivariate approach combining Global Horizontal Irradiation (GHI), slope, elevation, and terrain aspect. An unsupervised classification based on K-means identifies four clusters, accounting for 24.8%, 38.3%, 18.4%, and 18.5%, respectively, of the analyzed cells, thereby revealing several solar-topographic configurations. Principal Component Analysis (PCA) further confirms this structure: the first two components explain 100% of the total variance, with 68.3% accounted for by PC1 and 31.7% by PC2, primarily structured by the GHI-elevation relationship and slope. The regional mean GHI reaches 5.990 kWh/m²/day, with a standard deviation of 0.092 kWh/m²/day; its distribution exhibits moderate negative skewness (-0.434) and an excess kurtosis of -0.320. Ten candidate sites were subsequently preselected based on a GHI value greater than or equal to the 75th percentile, a slope $\leq 5^\circ$, and a continuous area ≥ 20 ha. Among these sites, S01 exhibits the most favorable relative profile, combining normalized area and GHI values close to 1.00 with a slope suitability score of approximately 0.64. These results provide a robust basis for prioritizing suitable areas before conducting a detailed feasibility assessment.

Keywords: photovoltaic potential; multivariate analysis; K-means; principal component analysis; Boeny.

1. INTRODUCTION

L'essor rapide du solaire photovoltaïque renforce son rôle dans la transition énergétique mondiale. En 2025, cette technologie a représenté plus des trois quarts des nouvelles capacités renouvelables installées à l'échelle mondiale, confirmant son importance croissante dans les stratégies de décarbonation et d'amélioration de l'accès à l'énergie [1]. À Madagascar, cet enjeu est particulièrement important puisque l'accès à l'électricité demeure limité, avec environ 42,5 % de la population raccordée en 2024, alors que le pays dispose de ressources renouvelables importantes, notamment solaires [2]. L'exploitation de cette ressource nécessite toutefois de dépasser une lecture fondée uniquement sur la quantité moyenne de rayonnement solaire. La pertinence d'un territoire pour le développement photovoltaïque dépend également de la variabilité spatiale du rayonnement, des caractéristiques du relief et de la disponibilité de surfaces suffisamment continues. Les données du Global Solar Atlas permettent à cet égard de caractériser spatialement l'irradiation globale horizontale et le potentiel photovoltaïque et constituent un support reconnu pour les analyses de prospection et de préféabilité [3]. Lorsque plusieurs variables spatiales interagissent, les méthodes multivariées permettent d'identifier des structures qui restent difficilement perceptibles par l'analyse séparée de chaque facteur. La classification non supervisée, notamment par l'algorithme K-means, permet ainsi de regrouper les observations présentant des caractéristiques similaires sans définir préalablement des catégories [4]. L'analyse en composantes principales (ACP) complète cette démarche en réduisant la dimension des données tout en conservant l'essentiel de leur variabilité et en mettant en évidence les variables responsables des principaux gradients observés [5]. Ces outils offrent ainsi une base pertinente pour construire une typologie solaire-topographique des territoires et mieux comprendre leur organisation spatiale. Dans cette perspective, la région Boeny, située dans le nord-ouest de Madagascar, constitue un cas d'étude approprié pour analyser la différenciation spatiale du potentiel photovoltaïque. Plutôt que de produire uniquement une carte synthétique d'aptitude, la présente étude cherche à identifier les principales configurations territoriales et à caractériser les zones candidates susceptibles de présenter des conditions favorables. Cette approche s'inscrit dans les démarches de sélection spatiale des sites d'énergies renouvelables, pour lesquelles la combinaison des outils géographiques et des méthodes multicritères ou multivariées constitue une pratique largement utilisée [6]. L'objectif de cette étude est donc d'analyser la structure multivariée du potentiel photovoltaïque de Boeny et d'établir une typologie spatiale des territoires afin de caractériser les principaux sites candidats. Plus précisément, l'analyse vise à identifier des groupes solaire-topographiques homogènes par classification K-means, à déterminer les principaux gradients de variabilité par ACP, à caractériser les anomalies spatiales du GHI par rapport à la moyenne régionale et à comparer les sites présélectionnés selon leur superficie, leur ressource solaire et leurs caractéristiques topographiques. L'approche proposée constitue ainsi une étape de screening régional, destinée à orienter les investigations techniques et territoriales plus détaillées nécessaires avant toute décision d'implantation.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude a été conduite à l'échelle de la région Boeny à partir de données géospatiales décrivant la ressource solaire, le relief et les limites administratives. L'irradiation globale horizontale (GHI) a été extraite du Global Solar Atlas et convertie en moyenne journalière exprimée en kWh/m²/jour. Cette base est adaptée aux analyses de prospection et de préféabilité solaire à l'échelle régionale [7]. Les caractéristiques topographiques ont été obtenues à partir d'un modèle numérique de terrain, dont ont été dérivées l'altitude, la pente et l'orientation. Les traitements ont été réalisés dans le système projeté WGS 84 / UTM zone 38S (EPSG:32738) afin de travailler dans une référence métrique. L'orientation a été décomposée en composantes northness et eastness, mieux adaptées aux traitements multivariés que l'utilisation directe des angles d'azimut. L'analyse numérique du terrain à partir d'un MNT constitue une démarche classique pour caractériser la morphologie et les attributs topographiques d'un territoire [8]. Après harmonisation des résolutions et des systèmes de coordonnées, les couches ont été découpées selon les limites de Boeny et regroupées sur une grille commune. Les variables GHI, pente, altitude, northness et eastness ont été standardisées afin de supprimer l'effet de leurs différences d'unités et d'amplitude. Une classification non supervisée K-means a ensuite été appliquée afin d'identifier automatiquement des ensembles de cellules présentant des caractéristiques solaire-topographiques similaires. Quatre groupes ont été retenus pour produire une typologie spatiale régionale. K-means constitue une méthode classique d'analyse exploratoire permettant de regrouper des observations selon leur similarité sans imposer de classes préalables [9]. Une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux mêmes variables standardisées afin d'identifier les

principaux gradients responsables de leur organisation spatiale. Les scores des deux premières composantes ont été utilisés pour représenter la structure des observations, tandis que les contributions des variables ont permis d'interpréter les facteurs associés à chaque axe. Cette méthode permet de réduire la dimension d'un jeu de données multivarié tout en conservant la plus grande partie possible de sa variabilité [10]. PubMed En parallèle, le GHI a été centré et standardisé par rapport à sa moyenne régionale afin de cartographier ses anomalies relatives. La distribution obtenue a été décrite à partir de la moyenne, de l'écart-type, de l'asymétrie et de la kurtosis, permettant d'identifier les secteurs présentant un rayonnement relativement supérieur ou inférieur au contexte régional. Enfin, une présélection spatiale des zones candidates a été réalisée en combinant un GHI supérieur ou égal au 75^e percentile régional, une pente inférieure ou égale à 5° et une surface continue minimale de 20 ha. Les dix principales zones continues ont été retenues puis comparées selon leur superficie, leur GHI moyen, leur aptitude relative liée à la pente et leur altitude. Ces variables ont été normalisées entre 0 et 1 afin de faciliter leur comparaison graphique. Cette démarche est cohérente avec les approches SIG utilisées pour la présélection de centrales photovoltaïques, dans lesquelles les facteurs solaires, topographiques et spatiaux sont examinés conjointement [11]. L'ensemble des traitements a été automatisé sous Python, principalement avec GeoPandas, Rasterio, NumPy et Matplotlib. Les résultats correspondent à un screening régional et non à une délimitation définitive des emprises de centrales, qui nécessiterait des données plus détaillées sur le réseau électrique, l'occupation du sol, l'accessibilité, les contraintes environnementales et foncières.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Typologie spatiale multivariée des conditions solaire-topographiques de la région Boeny par classification K-means

La figure ci-dessous présente une classification multivariée non supervisée des conditions solaire-topographiques de la région Boeny obtenue par l'algorithme K-means. La carte spatialise quatre groupes de cellules présentant des caractéristiques similaires, tandis que le graphique associé décrit leurs profils standardisés selon cinq variables : l'irradiation globale horizontale (GHI), la pente, l'altitude, la composante nord-sud de l'orientation (northness) et sa composante est-ouest (eastness). Les valeurs étant exprimées sous forme de scores standardisés, une valeur positive indique une position supérieure à la moyenne régionale pour la variable considérée, tandis qu'une valeur négative traduit une valeur inférieure à cette moyenne.

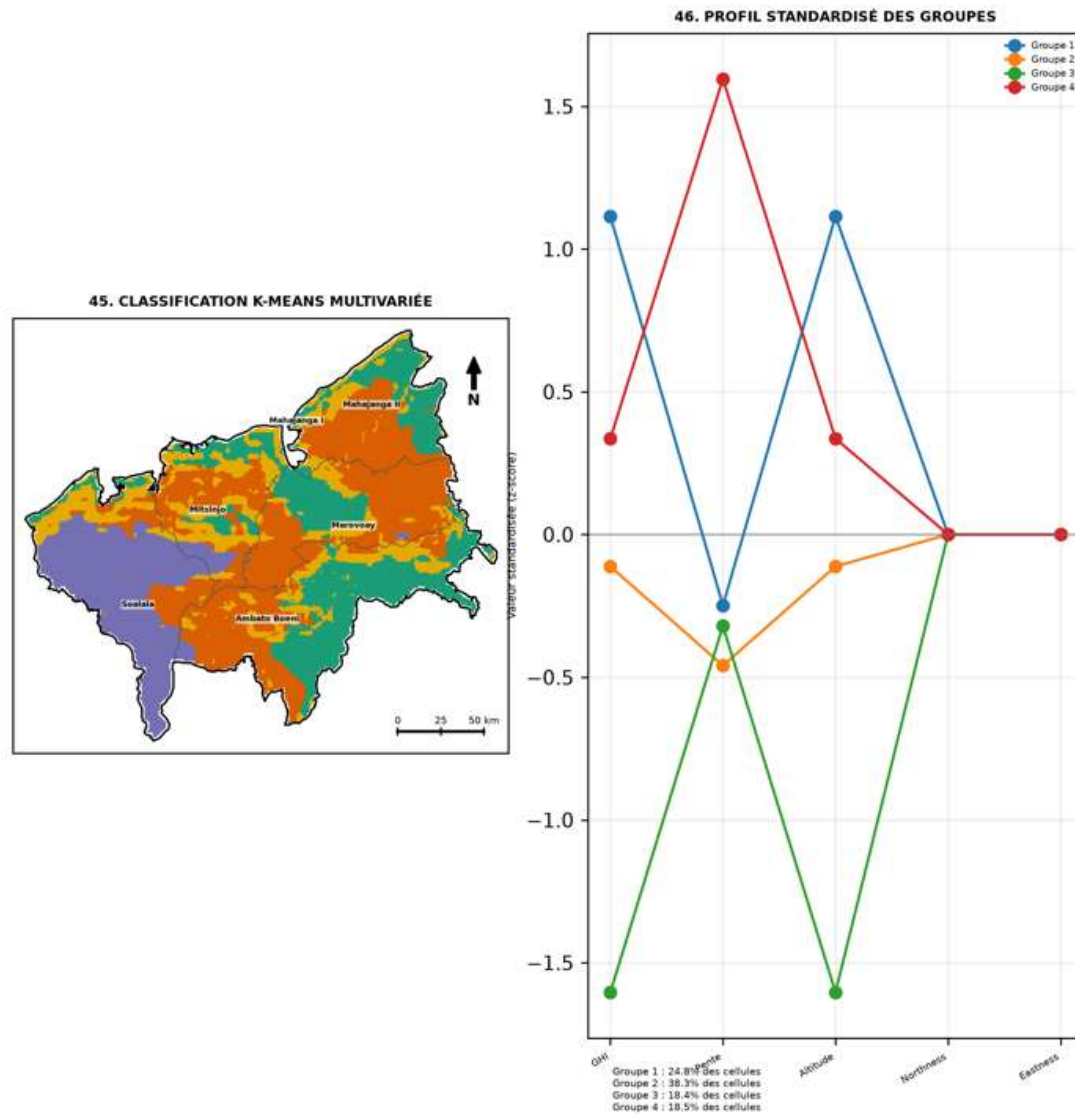


Figure 1: Typologie spatiale multivariée des conditions solaire-topographiques de la région Boeny par classification K-means

Source : Auteur

Interprétation

La classification met en évidence quatre ensembles spatiaux distincts, de poids relativement contrastés. Le groupe 2 est le plus représenté et rassemble 38,3 % des cellules, suivi du groupe 1 avec 24,8 %, tandis que les groupes 3 et 4 représentent respectivement 18,4 % et 18,5 %. Cette répartition montre qu'aucun profil unique ne caractérise l'ensemble de Boeny, même si près des deux tiers du territoire appartiennent aux groupes 1 et 2. Le groupe 1 se distingue par des valeurs fortement positives de GHI et d'altitude, avec des scores standardisés d'environ +1,1 pour chacune de ces deux variables. Sa pente est légèrement inférieure à la moyenne régionale, avec un score proche de -0,25. Il correspond donc à des secteurs combinant une ressource

solaire relativement élevée, une position altitudinale supérieure à la moyenne et des pentes faibles. Du point de vue de la présélection photovoltaïque, ce profil apparaît particulièrement intéressant, sous réserve que les autres contraintes territoriales soient favorables. Le groupe 2, qui constitue la classe dominante avec 38,3 % des cellules, présente un profil beaucoup plus proche de la moyenne régionale. Le GHI et l'altitude sont légèrement inférieurs à la moyenne, avec des valeurs standardisées voisines de $-0,1$, tandis que la pente atteint environ $-0,45$, soit la valeur relative la plus faible parmi les quatre groupes. Ce groupe caractérise ainsi des terrains particulièrement peu inclinés, mais dont la ressource solaire est légèrement moins élevée que celle des groupes 1 et 4. Sa forte représentation spatiale suggère que les surfaces faiblement contraintes par la topographie sont largement disponibles dans la région. Le groupe 3, représentant 18,4 % des cellules, se distingue nettement par les valeurs les plus faibles de GHI et d'altitude, toutes deux proches de $-1,6$ écart-type par rapport à la moyenne. Sa pente demeure néanmoins inférieure à la moyenne, avec un score d'environ $-0,3$. Spatialement, ce groupe est fortement concentré dans la partie occidentale et sud-occidentale de Boeny, notamment dans une large portion du district de Soalala. Il traduit donc principalement un contexte de basse altitude relative et de ressource solaire relativement plus faible, plutôt qu'une contrainte topographique forte. À l'inverse, le groupe 4, qui rassemble 18,5 % des cellules, présente le niveau relatif de pente le plus élevé, avec un score standardisé proche de $+1,6$. Son GHI et son altitude sont simultanément légèrement supérieurs à la moyenne, autour de $+0,3$ écart-type. Ce groupe représente ainsi des secteurs disposant d'une ressource solaire relativement favorable mais associés à une topographie comparativement plus marquée. Cependant, cette qualification doit rester relative : puisque les analyses précédentes ont montré que les pentes absolues de Boeny sont généralement très faibles, une valeur standardisée élevée signifie seulement que ces cellules sont plus inclinées que la moyenne régionale, et non qu'elles constituent nécessairement des terrains fortement pentus au sens de l'ingénierie photovoltaïque. Les variables d'orientation, représentées par la northness et l'eastness, affichent des scores pratiquement nuls dans les quatre groupes. Elles ne participent donc pas réellement à leur différenciation dans cette classification. Ce résultat est cohérent avec la prédominance de terrains très faiblement inclinés : lorsque les pentes sont proches de l'horizontale, l'orientation naturelle du versant devient peu significative. Dans ce contexte, la structure des groupes est essentiellement déterminée par le GHI, l'altitude et, dans une moindre mesure, la pente.

3.2 Structuration multivariée des gradients solaire-topographiques de la région Boeny par analyse en composantes principales

La figure ci-dessous présente les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée aux variables décrivant les conditions solaire-topographiques de la région Boeny. La carte de gauche représente la distribution spatiale des scores de la première composante principale (PC1), tandis que le biplot de droite permet d'examiner conjointement la position des observations et la contribution des variables GHI, pente, altitude, northness et eastness aux deux premiers axes factoriels. Cette analyse vise à identifier les principaux gradients organisant la variabilité spatiale régionale et à déterminer les variables responsables de leur différenciation.

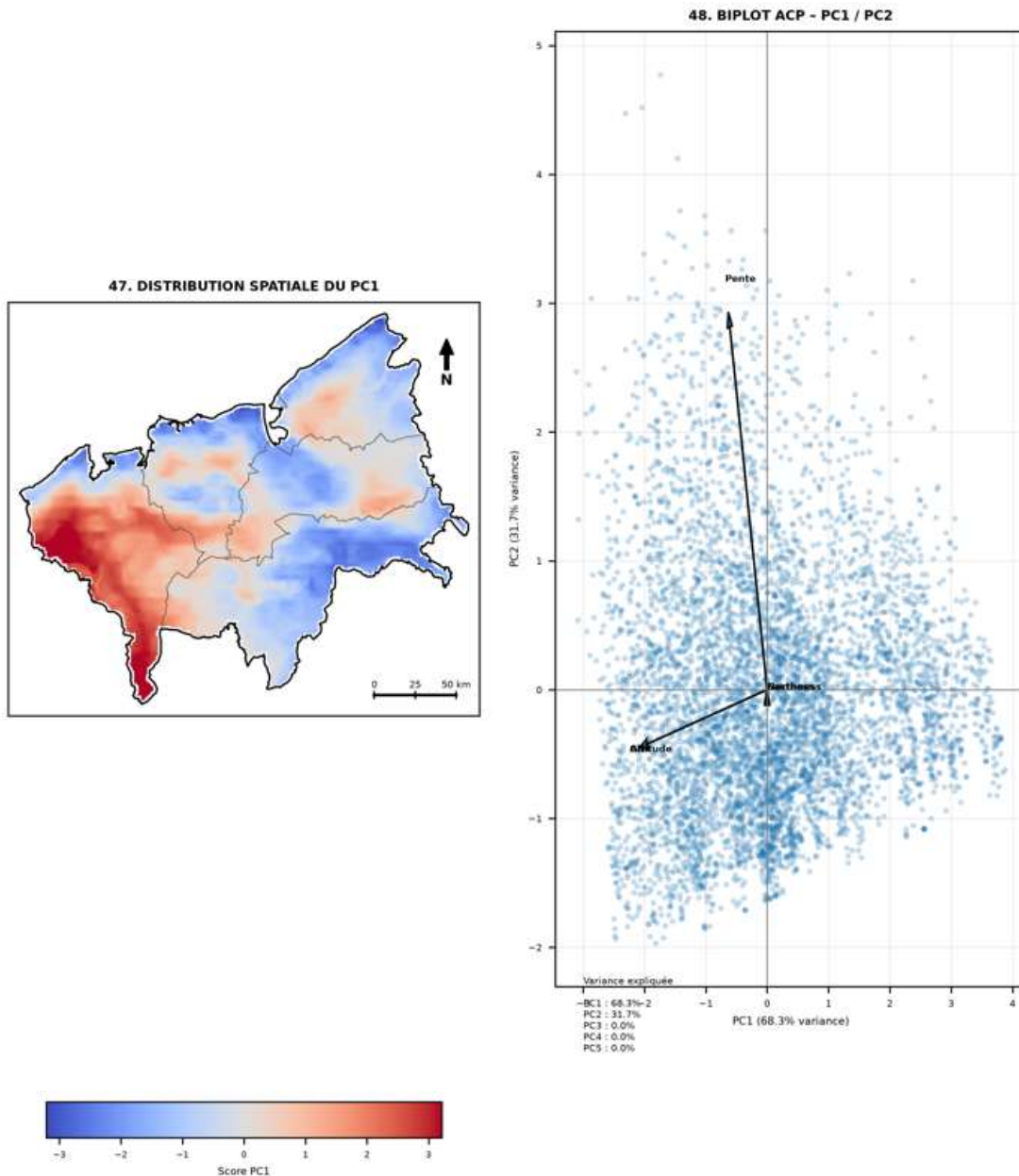


Figure 2: Structuration multivariée des gradients solaire-topographiques de la région Boeny par analyse en composantes principales

Source : Auteur

Interprétation

L'ACP met en évidence une structure factorielle particulièrement concentrée. La première composante, PC1, explique 68,3 % de la variance totale, tandis que PC2 en explique 31,7 %. Les composantes suivantes présentent une contribution pratiquement nulle. Ainsi, les deux premiers axes résument à eux seuls l'essentiel de la variabilité contenue dans les variables analysées, ce qui autorise une représentation bidimensionnelle particulièrement synthétique des contrastes solaire-topographiques de Boeny. La distribution spatiale de PC1 montre un gradient régional marqué. Les scores positifs, représentés par les teintes rouges à orangées et atteignant approximativement +3, sont principalement concentrés dans les secteurs occidentaux et sud-occidentaux, particulièrement dans une large partie de Soalala, ainsi que dans certaines portions centrales. À l'inverse, les scores négatifs, pouvant approcher -3, dominent plusieurs secteurs septentrionaux, orientaux et sud-orientaux. Cette organisation indique que PC1 oppose deux grands ensembles territoriaux présentant des combinaisons différentes des variables initiales plutôt qu'un simple gradient d'une seule caractéristique. Le biplot montre que le GHI et l'altitude sont orientés dans une direction relativement proche, vers les valeurs négatives de PC1. Leur proximité angulaire traduit une association positive dans l'espace factoriel : les secteurs caractérisés par des valeurs relativement élevées de l'une de ces variables tendent également à présenter des valeurs élevées de l'autre dans les données analysées. PC1 apparaît donc fortement associé à ce gradient conjoint solaire-altitudinal. Les territoires situés du côté négatif de cet axe sont davantage associés aux valeurs élevées portées par ces vecteurs, tandis que les secteurs présentant des scores PC1 positifs correspondent au profil opposé. La pente se distingue nettement par son orientation presque verticale dans le plan factoriel. Son vecteur est principalement dirigé vers les valeurs positives de PC2, indiquant que la deuxième composante est essentiellement structurée par les différences relatives de pente. Cette variable contribue donc davantage à la discrimination verticale des observations qu'à leur séparation selon PC1. Autrement dit, alors que le premier axe traduit principalement les contrastes associés au couple GHI-altitude, le second axe individualise surtout les variations topographiques liées à l'inclinaison du terrain. Cette configuration est cohérente avec la classification K-means précédente. Les différences entre groupes reposaient principalement sur le GHI, l'altitude et la pente, tandis que les composantes directionnelles de l'orientation contribuaient très peu à leur séparation. Dans le biplot, les vecteurs correspondant à la northness et à l'eastness restent effectivement très proches de l'origine. Leur faible longueur indique qu'elles contribuent peu à l'explication des deux premiers axes et qu'elles possèdent un pouvoir discriminant limité à l'échelle régionale. Ce résultat s'explique notamment par la prédominance de terrains très faiblement inclinés, pour lesquels l'orientation naturelle des versants perd une grande partie de sa signification géomorphologique. La dispersion des observations confirme par ailleurs l'existence d'une variabilité plus importante suivant PC1, avec des valeurs approximativement comprises entre -2,5 et +4, tandis que PC2 s'étend principalement entre -2 et +5. Une concentration importante des observations apparaît autour des valeurs centrales, mais plusieurs groupes de points s'étendent vers les extrêmes, témoignant de contextes locaux distincts au sein de la région.

3.3 Hiérarchisation spatiale et profils multicritères des principaux sites candidats à l'implantation photovoltaïque dans la région Boeny

La figure ci-dessous illustre les dix principales zones candidates issues de la présélection solaire-topographique dans la région Boeny. Les secteurs ont été retenus sur la base d'un GHI supérieur ou égal au 75^e percentile régional, d'une pente inférieure ou égale à 5° et d'une surface continue minimale de 20 ha. La carte de gauche localise les sites S01 à S10, tandis que le graphique de droite compare leurs profils normalisés selon quatre caractéristiques : la superficie, le GHI, l'aptitude liée à la pente et l'altitude. La normalisation sur une échelle de 0 à 1 permet une comparaison relative entre sites, sans confondre ces valeurs avec les unités physiques initiales.

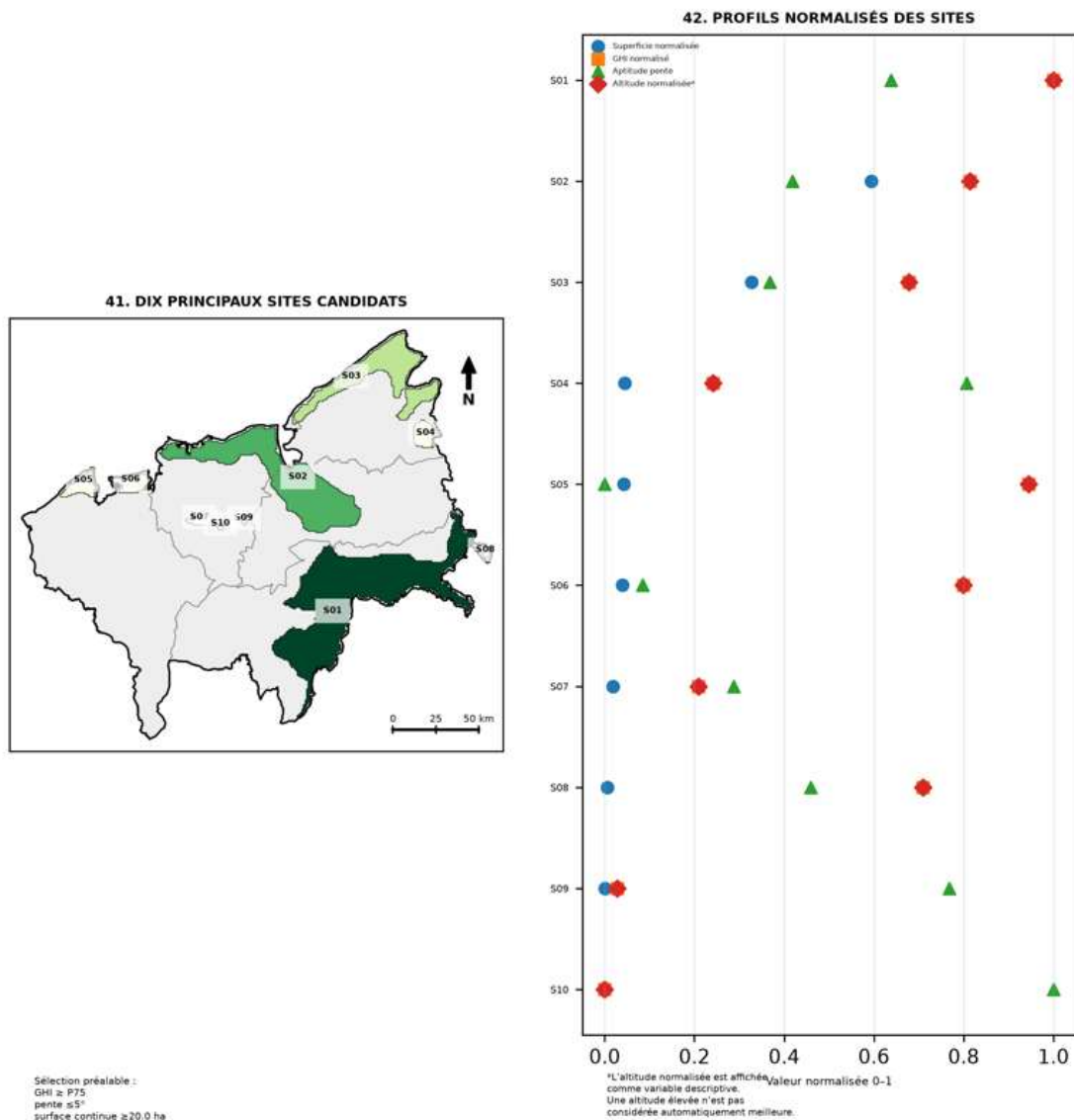


Figure 3: Hiérarchisation spatiale et profils multicritères des principaux sites candidats à l'implantation photovoltaïque dans la région Boeny

Source : Auteur

Interprétation

La distribution spatiale des dix sites candidats montre une organisation nettement différenciée à l'échelle régionale. Les zones les plus étendues, notamment S01 et S02, sont principalement localisées dans les parties orientale et sud-orientale de Boeny, tandis que plusieurs sites de dimensions plus réduites, tels que S05 à S10, apparaissent de manière plus fragmentée dans les secteurs occidentaux, centraux et périphériques. Cette configuration indique que les conditions répondant simultanément aux critères de

ressource solaire, de faible pente et de continuité spatiale ne sont pas réparties uniformément sur le territoire. Le site S01 présente le profil globalement le plus remarquable. Étant le site de référence pour la normalisation de la superficie, il atteint une valeur proche de 1,00 pour ce critère. Il présente également les valeurs normalisées maximales de GHI et d'altitude, proches de 1,00, tandis que son aptitude liée à la pente atteint environ 0,64. S01 combine ainsi une grande continuité spatiale, une ressource solaire élevée et des conditions topographiques relativement favorables. Parmi les dix zones identifiées, il constitue donc un candidat particulièrement intéressant pour une analyse de faisabilité plus détaillée. Le site S02 présente également un profil relativement équilibré, avec une superficie normalisée d'environ 0,60, un GHI proche de 0,82 et une aptitude de pente d'environ 0,42. Il se distingue ainsi comme le deuxième grand ensemble continu après S01. Le site S03 affiche une superficie plus modérée, proche de 0,32, et un GHI normalisé d'environ 0,68–0,70, avec une aptitude de pente autour de 0,36. Ces deux sites peuvent donc être considérés comme des alternatives intéressantes, même si leur combinaison de critères apparaît moins favorable que celle de S01. Les autres sites illustrent davantage les compromis inhérents à une sélection multicritère. S04, par exemple, possède une faible superficie normalisée, proche de 0,05, et un GHI relativement modeste, autour de 0,24, mais présente une aptitude de pente élevée d'environ 0,81. À l'inverse, S05 affiche un GHI très élevé, proche de 0,95, mais son aptitude topographique normalisée est proche de 0, ce qui signifie qu'il présente, parmi les dix sites retenus, la pente relativement la moins favorable, tout en restant sous le seuil absolu de 5° utilisé lors de la présélection. Une situation similaire est observée pour S06, dont le GHI atteint environ 0,80, alors que son aptitude de pente reste faible, autour de 0,08. S07 présente un profil davantage intermédiaire, avec un GHI d'environ 0,21, une aptitude de pente proche de 0,30 et une faible superficie relative. S08 combine un GHI relativement élevé, autour de 0,70–0,72, avec une aptitude topographique intermédiaire proche de 0,46, mais sa superficie reste très réduite par rapport aux premiers sites. Les sites S09 et S10 constituent un cas inverse particulièrement instructif. Ils appartiennent aux plus petites unités continues de la sélection, avec des superficies normalisées proches de 0. Leur GHI relatif est également parmi les plus faibles, proche de 0,03 pour S09 et de 0 pour S10. En revanche, leur aptitude liée à la pente atteint respectivement environ 0,77 et 1,00. S10 représente ainsi le terrain relativement le plus favorable du point de vue de la pente, mais cet avantage est contrebalancé par sa faible superficie et son niveau de GHI relatif moins élevé.

3.4 Variabilité spatiale et distribution statistique des anomalies du rayonnement solaire global

La figure suivante présente la distribution spatiale des anomalies standardisées de l'irradiation globale horizontale (GHI) dans la région Boeny ainsi que leur distribution statistique. La carte de gauche représente, pour chaque cellule, l'écart du GHI par rapport à la moyenne régionale exprimé en unités d'écart-type, tandis que l'histogramme de droite compare la distribution observée à une distribution normale standard. Cette approche permet d'identifier les secteurs présentant des niveaux de rayonnement relativement supérieurs ou inférieurs à la moyenne régionale et d'évaluer simultanément la forme générale de la distribution du GHI.

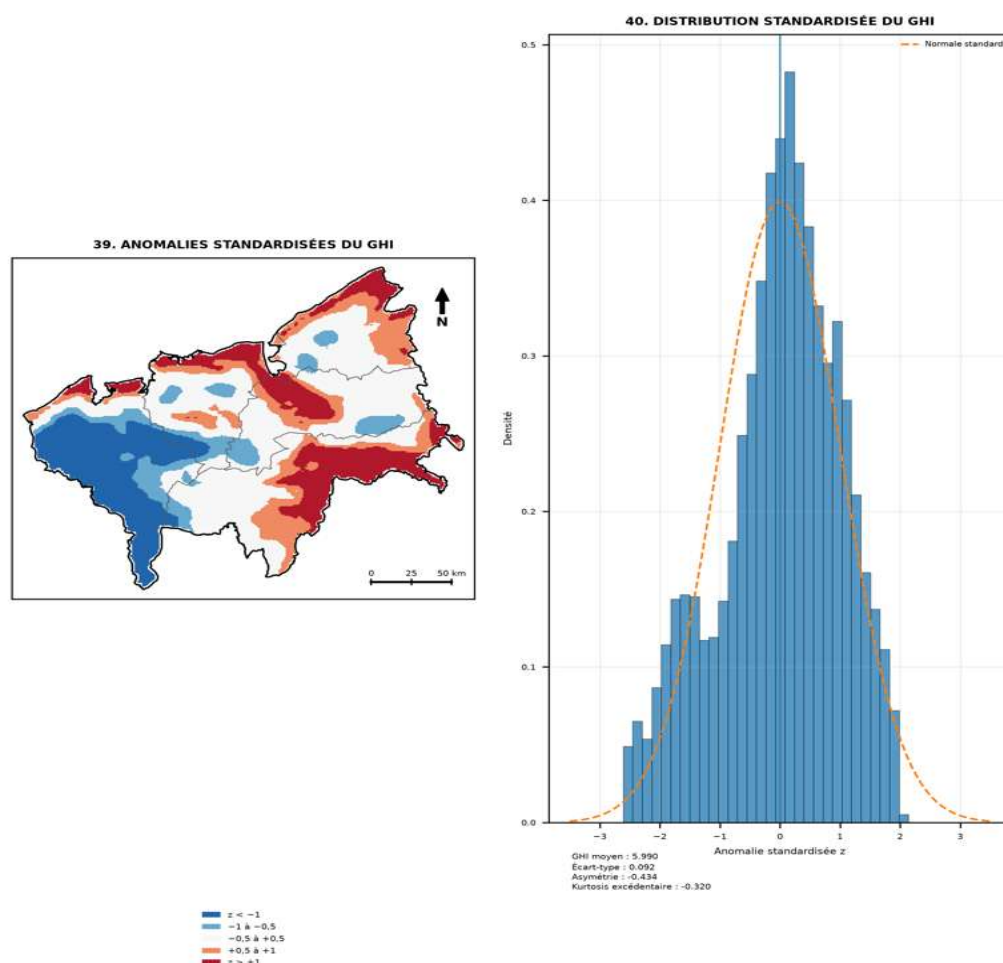


Figure 4 : Variabilité spatiale et distribution statistique des anomalies du rayonnement solaire global

Source : Auteur

Interprétation

Les résultats montrent que le GHI présente une variabilité relativement faible à l'échelle de Boeny, avec une moyenne régionale de 5,990 kWh/m²/jour et un écart-type de seulement 0,092 kWh/m²/jour. Cette faible dispersion confirme que la région bénéficie d'une ressource solaire globalement homogène, même si des contrastes spatiaux relatifs restent clairement perceptibles. La carte des anomalies standardisées révèle une organisation spatiale structurée. Les valeurs fortement négatives, correspondant à des anomalies $z < -1$, sont principalement concentrées dans les secteurs occidentaux et sud-occidentaux, notamment sur une grande partie de Soalala. Ces zones présentent donc des niveaux de GHI inférieurs d'au moins un écart-type à la moyenne régionale. Des anomalies modérément négatives, comprises entre -1 et $-0,5$, apparaissent également dans plusieurs secteurs centraux et nord-occidentaux. À l'inverse, les anomalies positives les plus marquées, avec $z > +1$, se concentrent surtout dans les parties septentrionales, nord-orientales, orientales et sud-orientales de la région. Ces secteurs disposent d'un GHI supérieur d'au moins un écart-type à la moyenne régionale et constituent donc, du seul point de vue de la ressource solaire, les zones relativement les plus favorables. Les classes intermédiaires, comprises entre $-0,5$ et $+0,5$, occupent une part importante du territoire et

correspondent à des conditions proches de la moyenne régionale. L'histogramme montre une distribution globalement unimodale et relativement proche d'une forme gaussienne, mais avec quelques différences notables. Le coefficient d'asymétrie est de $-0,434$, ce qui traduit une asymétrie négative modérée : la distribution possède une queue légèrement plus développée vers les faibles valeurs de GHI. Autrement dit, les écarts négatifs extrêmes sont un peu plus prononcés que les écarts positifs. La kurtosis excédentaire de $-0,320$ indique par ailleurs une distribution légèrement plus aplatie qu'une distribution normale standard. Cette caractéristique suggère une concentration moins forte autour de la moyenne et des extrêmes un peu moins fréquents que dans une distribution strictement gaussienne. La courbe normale superposée reproduit néanmoins correctement la structure générale de l'histogramme, ce qui confirme que les anomalies restent globalement centrées autour de la moyenne.

4. DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence une organisation spatiale nette du potentiel photovoltaïque dans la région Boeny. La classification K-means distingue quatre groupes représentant 24,8 %, 38,3 %, 18,4 % et 18,5 % des cellules analysées, ce qui montre que le territoire ne peut pas être considéré comme homogène du point de vue solaire et topographique. Les groupes sont principalement différenciés par le GHI, l'altitude et la pente, alors que la northness et l'eastness jouent un rôle très limité. Cette faible contribution de l'orientation est cohérente avec la prédominance de terrains très faiblement inclinés. L'ACP confirme cette structuration en montrant que les deux premiers axes résument pratiquement toute la variabilité observée, avec 68,3 % pour PC1 et 31,7 % pour PC2. Le premier axe traduit surtout un gradient associant le GHI et l'altitude, tandis que le second est davantage lié à la pente. Cette organisation rejoint les résultats du clustering et renforce l'idée que quelques dimensions principales suffisent à expliquer les contrastes spatiaux régionaux. La concentration de la variance sur seulement deux axes devra néanmoins être vérifiée avant publication, notamment au regard de la très faible variabilité des composantes d'orientation. L'analyse des anomalies du GHI montre par ailleurs une ressource solaire globalement homogène, avec une moyenne de $5,990 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ et un écart-type de seulement $0,092 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$. Les anomalies positives se concentrent principalement dans les secteurs orientaux et septentrionaux, tandis que les anomalies négatives dominent davantage à l'ouest, notamment vers Soalala. L'asymétrie de $-0,434$ et la kurtosis excédentaire de $-0,320$ traduisent une distribution légèrement dissymétrique et modérément aplatie, sans remise en cause de l'homogénéité générale de la ressource. La caractérisation des dix sites candidats montre enfin que S01 présente le meilleur compromis relatif entre continuité spatiale, niveau de GHI et aptitude topographique, avec des valeurs normalisées proches de 1,00 pour la superficie et le GHI et d'environ 0,64 pour l'aptitude liée à la pente. Les autres sites illustrent différents compromis entre ressource solaire, superficie et topographie, confirmant qu'aucun critère ne doit être utilisé isolément pour la sélection des emprises. L'approche multivariée permet donc de passer d'une simple cartographie du potentiel à une véritable typologie territoriale et hiérarchisation des sites. Les résultats restent toutefois adaptés à un screening régional. Leur utilisation pour une décision d'investissement nécessitera des données plus fines sur le réseau électrique, l'accessibilité, l'occupation du sol, les contraintes environnementales et foncières, ainsi qu'une topographie de résolution plus élevée.

5. CONCLUSION

Cette étude montre que l'analyse multivariée constitue une approche pertinente pour caractériser la diversité spatiale du potentiel photovoltaïque dans la région Boeny. La classification K-means a permis d'identifier quatre profils solaire-topographiques distincts, tandis que l'ACP a montré que l'essentiel de la variabilité régionale est structuré par le GHI, l'altitude et la pente. La ressource solaire apparaît globalement élevée et relativement homogène, avec un GHI moyen de $5,990 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ et un écart-type de $0,092 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$, malgré l'existence de contrastes spatiaux internes. La comparaison des sites candidats met en évidence S01 comme le profil relatif le plus favorable, grâce à la combinaison d'une forte continuité spatiale, d'un GHI élevé et de conditions topographiques satisfaisantes. Ces résultats fournissent ainsi une base objective pour la hiérarchisation des territoires et la présélection de sites photovoltaïques. Ils devront toutefois être complétés par des critères d'accessibilité, de raccordement au réseau électrique, d'occupation du sol, de contraintes environnementales et foncières avant toute décision d'implantation définitive.

RÉFÉRENCE

- [1] International Energy Agency (IEA). (2026). Global Energy Review 2026: Technology – Solar PV and Wind. Paris: IEA.
- [2] World Bank. (2026). Madagascar – Data: Access to electricity (% of population). Donnée la plus récente : 2024. World Bank Open Data
- [3] Betak, J., Caltik, M., Cebecauer, T., Chrkavy, D., Erdelyi, B., Rosina, K., Suri, M., & Suriova, N. (2020). Global Photovoltaic Power Potential by Country. Washington, DC: World Bank–ESMAP. Esmap
- [4] Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, 31(8), 651–666. DOI: 10.1016/j.patrec.2009.09.011. ScienceDirect
- [5] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374, 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.
- [6] Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. Renewable Energy, 157, 377–403. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.137.
- [7] ESMAP. (2019). Global Solar Atlas 2.0: Technical Report. Washington, DC: World Bank. World Bank
- [8] Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (Eds.). (2000). Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley & Sons. Wiley-VCH
- [9] Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, 31(8), 651–666. DOI: 10.1016/j.patrec.2009.09.011. ScienceDirect
- [10] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374, 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202. DOI
- [11] Noorollahi, Y., Ghenaatpisheh Senani, A., Fadaei, A., Simaee, M., & Moltames, R. (2022). A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach. Renewable Energy, 186, 89–104. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.124.