

Une approche d'analyse SWOT pour le développement durable de l'énergie photovoltaïque en Tunisie

Hedi TRABELSI^{#1}, Younes BOUJELBENE^{#2}

*[#]Laboratoire d'Economie et de Gestion (LEG), Faculté des Sciences Economiques et de Gestion de Sfax
Université de Sfax, Tunisie*

¹trabelssihedi@gmail.com

²younes.boujelbene@gmail.com

Résumé— Cette recherche utilise une analyse complète des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces (SWOT) pour étudier l'avancement de l'énergie photovoltaïque (PV) dans la Tunisie. L'étude se penche sur les subtilités de l'introduction de systèmes photovoltaïques dans le contexte des défis économiques, y compris des questions telles que la volatilité des devises et l'inflation, qui amplifient les coûts et entravent les investissements en capital. Les facteurs environnementaux, tels que la poussière et les tempêtes de sable, sont identifiés comme des obstacles diminuant l'efficacité des panneaux solaires. Ce document propose des stratégies d'atténuation efficaces, englobant de vastes campagnes de sensibilisation du public pour accroître l'engagement du marché, la mise en place de mini-réseaux pour améliorer la distribution d'énergie, des programmes de formation sur le tas personnalisés pour favoriser l'expertise locale en technologie photovoltaïque et l'utilisation de micro-réseaux comme bases expérimentales pour les tests réglementaires et politiques. En synthétisant ces composantes, cette étude offre un aperçu complet des conditions préalables essentielles à la prolifération réussie de l'énergie photovoltaïque dans la Tunisie. L'accent est mis sur le potentiel de l'énergie solaire à contribuer de manière significative au développement durable du pays et à atteindre l'indépendance énergétique lorsque les forces et les opportunités identifiées sont exploitées. La force clé identifiée est l'irradiance horizontale mondiale moyenne (GHI), l'irradiance normale directe (DNI), le coût nivelé de l'électricité (LCOE), et la possibilité d'utiliser pleinement la subvention de plus de 7,88 millions dollars autorisée par la Banque africaine de développement (BAD) du fonds pour l'énergie durable en Afrique.

Mots clés— Analyse SWOT, PV, Énergie renouvelable, Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces.

I. INTRODUCTION

1. Motivation

Alors que la communauté mondiale est aux prises avec le besoin urgent de développement durable et d'action climatique, le rôle des sources d'énergies renouvelables n'a jamais été aussi critique. Tandis que les pays du monde entier progressent à grands pas dans l'abandon des combustibles fossiles, le défi est particulièrement aigu dans les pays en développement où la demande d'énergie augmente rapidement parallèlement au développement économique.

L'un de ces pays est la Tunisie, le pays le plus peuplé d'Afrique, où la demande d'énergie devrait monter en flèche dans les décennies à venir. L'accès à une énergie fiable et durable n'est pas seulement une question de commodité ; c'est une condition préalable pour atteindre des objectifs socio-économiques tels que la réduction de la pauvreté, l'amélioration des soins de santé et l'industrialisation [1].

La production nationale de la Tunisie en pétrole brut s'est située à 917 kilotonnes (kt), à fin Août 2024, enregistrant, ainsi, une baisse de 13% par rapport à fin Août 2023, c'est ce qui ressort du rapport de la conjoncture

énergétique pour Août 2024, publié par l'Observatoire national de l'énergie et des mines [26]. Cette dure réalité entrave gravement la croissance économique et perpétue les inégalités, faisant de la recherche de sources d'énergies alternatives et fiables un impératif national. La Tunisie, en particulier, est dotée de ressources solaires abondantes, recevant en moyenne 9,20 heures de lumière solaire par jour [2]. Cet avantage naturel offre une avenue prometteuse pour le déploiement de l'énergie solaire, mais le pays reste mal desservi et sous-développé en termes de potentiel d'énergie solaire. L'urgence d'explorer et d'exploiter des formes d'énergies plus propres est davantage motivée par l'engagement de la Tunisie envers les objectifs climatiques mondiaux, y compris son engagement à réduire inconditionnellement les émissions de gaz à effet de serre de 20 % d'ici 2030 dans le cadre de l'Accord de Paris [21]. Le développement de l'énergie photovoltaïque (PV) dans la Tunisie s'aligne non seulement sur les objectifs mondiaux de durabilité, mais a également le potentiel de réduire la pauvreté énergétique nationale, de favoriser la croissance économique et de réduire les émissions de carbone [3].

2. Contribution des travaux

La principale contribution de cette étude réside dans son exploration ciblée et approfondie du paysage énergétique photovoltaïque (PV) dans la Tunisie à travers le prisme d'une analyse SWOT (forces, faiblesses, opportunités et menaces) complète. Le sujet des énergies renouvelables a été largement étudié dans divers contextes mondiaux, mais ce travail cherche à combler une lacune importante dans la littérature existante en se concentrant sur des conditions uniques et le potentiel inexploité de la Tunisie qui est caractérisée par des ressources solaires abondantes mais limitée par une multitude de défis. En utilisant un cadre SWOT, cette étude va au-delà de la simple analyse descriptive pour fournir des informations exploitables qui sont essentielles pour les décideurs, les investisseurs et les communautés locales. La méthodologie permet une compréhension détaillée du secteur en identifiant non seulement les atouts et les limites des infrastructures existantes mais aussi en soulignant les fenêtres d'opportunités et les risques potentiels associés au développement de l'énergie photovoltaïque dans ce pays. Le document élargit le discours en disséquant diverses dimensions affectant le secteur photovoltaïque - techniques, économiques, environnementales. En adoptant cette approche multidimensionnelle, l'étude offre une vision plus holistique qui saisit les complexités et les interdépendances de ces dimensions. En termes d'implications théoriques, cette étude contribue au dialogue universitaire plus large autour des énergies renouvelables dans les pays en développement. Il plaide en faveur d'une approche plus localisée et spécifique au pays en matière de politique et de planification énergétiques, fournissant des preuves empiriques qui pourraient être bénéfiques pour des études similaires dans d'autres pays en développement disposant de ressources renouvelables abondantes mais sous-utilisées.

3. Structure du document

Le reste du document est organisé comme suit : La section 2 présentera un contexte et un examen sur les énergies renouvelables en Tunisie. Dans la section 3, les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces de l'énergie solaire photovoltaïque dans la Tunisie seront étudiées. La section 4 abordera les divers travaux de recherche examinés dans les sections antérieures. Une conclusion sera fournie dans la section 5.

II. ENERGIES RENOUVELABLES EN TUNISIE

La Tunisie, l'un des pays les plus peuplés d'Afrique, se vante de ressources naturelles abondantes. Malgré ça, le pays est aux prises avec une crise énergétique persistante qui touche à la fois les populations urbaines et rurales. Pour remédier à ce déficit et à la transition vers des pratiques durables, l'attention s'est de plus en plus tournée vers les sources d'énergies renouvelables. Ces sources sont non seulement respectueuses de l'environnement, mais aussi abondantes dans le pays, en particulier dans les régions du sud. Le récit entourant les énergies renouvelables en Tunisie est complexe, impliquant des facteurs tels que les cadres politiques, les conditions socio-économiques et les progrès technologiques.

Le pays est pourtant doté d'énormes ressources d'énergie renouvelable, qui demeurent largement inexploitées. La situation géographique du pays lui offre des ressources solaires, éoliennes, hydroélectriques et de biomasses importantes. L'énergie solaire, par exemple, serait abondante, en particulier dans la Tunisie, où le rayonnement solaire moyen est d'environ 9.20 heures par jour [3]. Selon l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), l'Afrique détient environ 50 % du potentiel mondial en énergies renouvelables, mais sa contribution actuelle aux énergies renouvelables mondiales est inférieure à 10 % [18]. Cela souligne un paradoxe flagrant, alors

que les ressources sont abondantes, leur conversion en formes d'énergies utilisables a été minime. Ce potentiel inexploité représente à la fois une opportunité importante et un défi substantiel pour l'avenir énergétique du pays [4].

Le gouvernement tunisien a déployé une série d'efforts politiques pour stimuler l'adoption de technologies d'énergie renouvelable dans tout le pays. Parmi ces initiatives, notons le Plan Solaire Tunisien (PST) [5]. Ce cadre politique vise divers objectifs, tels que l'amélioration du climat d'investissement pour les énergies renouvelables, la promotion du développement de mini-réseaux et la promotion de solutions décentralisées en matière d'énergies renouvelables. L'objectif global est de diversifier le bouquet énergétique et de réduire la dépendance du pays aux combustibles fossiles. Le PST fournit des activités de renforcement des capacités visant à stimuler les investissements dans les énergies renouvelables. L'un de ses principaux objectifs est de favoriser le développement de mini-réseaux pour desservir les communautés hors réseau, contribuant ainsi à l'électrification rurale. Bien que les politiques puissent sembler complètes sur le papier, leur mise en œuvre a été confrontée à des multiples obstacles [5].

L'une des lacunes les plus citées est l'infrastructure du réseau électrique existant, qui n'est pas conçue de manière optimale pour l'intégration de projets d'énergie renouvelable à grande échelle [19]. Contrairement aux sources d'énergies conventionnelles, les énergies renouvelables nécessitent souvent des réseaux intelligents capables de gérer la variabilité et l'intermittence associées à des sources comme le solaire et l'éolien [7]. Malheureusement, les infrastructures existantes en Tunisie ne sont pas bien équipées pour gérer ces défis uniques. Le manque de préparation technologique et infrastructurelle va au-delà des défis immédiats de mise en œuvre ; il a également un effet étouffant sur les investissements potentiels. Les investisseurs évaluent généralement l'état de préparation de l'infrastructure d'un pays avant d'engager des ressources dans des projets à grande échelle. Le système de réseau inadéquat, associé à un manque d'installations dédiées aux énergies renouvelables comme les parcs éoliens ou solaires, a tendance à décourager les investisseurs potentiels. Cela conduit à un problème cyclique où le manque d'investissement entraîne un développement technologique et infrastructurel stagnant, ce qui décourage davantage l'investissement. Au-delà des infrastructures du réseau, d'autres éléments technologiques nécessaires au déploiement efficace des énergies renouvelables font défaut. Par exemple, l'expertise locale en matière d'installation et de maintenance de systèmes d'énergie renouvelable est limitée [20]. L'avenir des énergies renouvelables en Tunisie semble optimiste en raison d'une combinaison de facteurs locaux et mondiaux. À l'échelle mondiale, l'accent est de plus en plus mis sur les solutions énergétiques durables, en grande partie motivées par les préoccupations liées au changement climatique et les accords internationaux tels que l'Accord de Paris [21]. Comme la Tunisie est signataire de ces initiatives mondiales, le pays fait face à une pression externe croissante pour décarboner son secteur d'énergie. Cela se traduit par un environnement politique plus propice aux énergies renouvelables, ce qui rend probable que des politiques de soutien ne seront pas seulement formulées, mais pourront également voir une mise en œuvre plus solide. En outre, la trajectoire des énergies renouvelables en Tunisie est encore renforcée par les progrès technologiques qui ont rendu les systèmes d'énergies renouvelables plus efficaces et plus rentables.

Il convient également de noter que l'accessibilité et la disponibilité croissantes des solutions d'énergies renouvelables peuvent créer une synergie avec d'autres secteurs, tels que l'agriculture et la fabrication, stimulant ainsi la croissance économique et la création d'emplois [22]. Les énergies renouvelables peuvent aider à alimenter les systèmes d'irrigation, les usines de transformation des aliments et les petites usines, contribuant ainsi à un développement plus durable.

III. ANALYSE SWOT

L'analyse SWOT a longtemps servi de pierre angulaire dans les processus de planification stratégique. Dans le contexte du développement de l'énergie solaire dans la Tunisie, ce cadre évalue l'interaction des forces et des faiblesses internes avec les opérations externes opportunités et menaces.

Dans la Tunisie, les forces inhérentes sont évidentes, y compris un terrain étendu et une irradiation solaire abondante. Ces attributs offrent une base solide pour le développement de l'énergie solaire. En outre, il existe des opportunités de croissance, telles que la sensibilisation accrue au changement climatique, la diminution des coûts des équipements solaires et la demande croissante du marché.

Cependant, certaines faiblesses doivent être corrigées pour capitaliser pleinement sur ces opportunités. Les défis liés aux cadres réglementaires et politiques, ainsi qu'aux capacités institutionnelles, nécessitent une attention particulière. En outre, les menaces externes telles que l'instabilité économique et les problèmes de sécurité constituent des obstacles importants. S'attaquer aux faiblesses tout en tirant une partie des forces et des opportunités

est essentiel pour surmonter les menaces et faire progresser le développement de l'énergie solaire dans la Tunisie. Dans ce cas, le pays peut franchir des étapes importantes dans le déploiement de l'énergie durable, contribuant à la fois à la prospérité locale et aux objectifs environnementaux mondiaux [24].

1. Forces

Les forces de la Tunisie en termes de développement de l'énergie photovoltaïque (PV) sont enracinées dans ses ressources naturelles, sa situation géographique et son potentiel de croissance économique. En tirant parti de ces atouts, la Tunisie peut libérer son vaste potentiel de développement de l'énergie solaire photovoltaïque, contribuant ainsi à une croissance économique durable, une sécurité énergétique et une économie d'énergie.

1.1 Avantage géographique

La principale force de la Tunisie pour produire de l'électricité en utilisant des ressources solaires est sa situation géographique caractérisée par l'abondance de l'énergie solaire [23].

La Tunisie est le pays dans son ensemble sont bénis avec de vastes sources naturelles de ressources énergétiques renouvelables telles que l'énergie solaire qui est essentielle pour le développement durable du pays. Cependant, ces ressources sont très sous-exploitées et sous-utilisées [10]. La force des ressources solaires dans ce pays peut être visualisée à l'aide des paramètres suivants : potentiel théorique appelé irradiance horizontale globale, GHI, potentiel pratique appelé production d'énergie photovoltaïque, irradiance normale directe (DNI) et le coût de l'électricité nivelé (LCOE).

1.2 Avantage géographique

Le rayonnement solaire est essentiellement une ressource gratuite dans le monde entier. La transformation du rayonnement solaire en électricité est dominée par les centrales photovoltaïques. Cette technologie devient une occasion de renforcer les pays et les communautés pour la transformation ou le développement de leurs infrastructures énergétiques et de renforcer la transition énergétique à faible émission de carbone.

Compte tenu de la force solaire photovoltaïque dans la partie sud du Tunisie, ceux-ci pourraient être résumés comme un dérivé de la situation géographique, de l'abondance des ressources solaires dans le pays [25].

1.3 Sécurité énergétique

La sécurité énergétique dans la Tunisie est considérablement renforcée par son potentiel d'énergie solaire. La lumière abondante du soleil de la région fournit une source d'énergie fiable et durable qui peut grandement améliorer l'indépendance et la stabilité énergétique. En capitalisant sur les valeurs élevées de l'irradiation horizontale globale (GHI) et de l'irradiation normale directe (DNI), la Tunisie peut réduire sa dépendance aux combustibles importés, atténuer les perturbations de l'approvisionnement énergétique et contribuer à un portefeuille énergétique diversifié. Le passage à l'énergie solaire soutient non seulement une transition à faible émission de carbone, mais favorise également la croissance économique et le développement des infrastructures. La technologie solaire devient de plus en plus rentable, elle présente une solution viable pour la sécurité énergétique à long terme.

2. Faiblesses

Les lacunes dans la croissance de l'énergie photovoltaïque (PV) dans la Tunisie sont soigneusement étudiées dans cette section. Malgré le vaste potentiel solaire du pays, un certain nombre d'obstacles empêchent l'utilisation et le déploiement efficaces des systèmes d'énergies photovoltaïques. Cette section identifie et discute les principales lacunes dans le développement de l'énergie photovoltaïque dans la Tunisie grâce à un examen approfondi de l'ensemble du matériel disponible. Les résultats aident à clarifier les obstacles et à donner aux décideurs, aux chercheurs de nouvelles perspectives sur la façon de les surmonter et de soutenir la croissance et le développement de l'énergie solaire durable dans le pays.

Le développement des systèmes d'énergies photovoltaïques est excellent dans la Tunisie en raison du rayonnement solaire abondant du pays. Cependant, plusieurs problèmes empêchent l'adoption de l'énergie photovoltaïque dans le pays. L'objectif de cette analyse est d'identifier ces failles et de proposer des solutions [24].

2.1. Sensibilisation et diffusion de l'information limitées

L'une des principales limites est le manque d'informations largement connues et diffusées sur l'énergie photovoltaïque dans la Tunisie. L'acceptation généralisée de l'énergie photovoltaïque est entravée par un manque de sensibilisation du public à ses avantages, ses technologies et ses applications. Grâce à des campagnes de sensibilisation ciblées et à des initiatives éducatives, des efforts devraient être déployés pour éclairer le grand public, les décideurs et les autres acteurs concernés.

2.2. Cadres réglementaires et politiques inadéquats

L'incertitude du marché est causée par le manque de cadres réglementaires complets et de règles insuffisantes pour la croissance de l'énergie photovoltaïque. Pour encourager l'investissement privé et le déploiement de l'énergie photovoltaïque, le gouvernement devrait créer des lois et des règlements clairs qui offrent des incitations telles que des réductions d'impôts, des tarifs de rachat [6].

2.3. Accès limité au financement

L'absence de financement abordable est un obstacle majeur à la croissance de l'énergie photovoltaïque dans la Tunisie. Les projets d'énergies renouvelables sont souvent considérés par les institutions financières comme des entreprises à haut risque, ce qui limite l'offre de prêts et de faciliter le crédit [24].

3. Opportunités

Cette section examine les opportunités de la croissance potentielle de l'électricité photovoltaïque (PV) dans la Tunisie. Outre, le potentiel solaire exceptionnel du pays, il existe d'autres perspectives d'augmentation du déploiement du photovoltaïque dans la Tunisie. Les sous-sections suivantes analysent soigneusement le corps d'informations accessibles pour identifier et élaborer des points cruciaux. Les résultats sont destinés à fournir aux décideurs, aux chercheurs de nouvelles idées sur la façon d'utiliser les opportunités pour promouvoir l'expansion de l'énergie solaire durable dans le pays.

3.1. Accroissement de la sensibilisation universelle au changement climatique

La prise de conscience de la nécessité mondiale à la transition vers les énergies renouvelables a été augmenté ces dernières années. Les gouvernements du monde entier, y compris la Tunisie, recherchent activement des méthodes pour produire de l'énergie avec un impact environnemental réduit, dans le but de fournir des bénéfices aux générations actuelles et futures.

La Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement (CNUCED) a révélé que les 100 premières entreprises énergétiques mondiales se concentrent progressivement sur les sources d'énergies renouvelables, cédant leurs actifs de combustibles fossiles à un rythme d'environ 15 milliards de dollars par an [11]. En outre, des institutions financières telles que la Banque mondiale et la Société financière internationale ont lancé des programmes de soutien à des pays comme le Ghana, le Libéria et la Sierra Leone, à la suite d'un engagement international pris en Avril 2016 au siège des Nations Unies pour aider les pays en développement, en particulier ceux d'Afrique, à faire progresser l'énergie photovoltaïque.

Parmi ces initiatives, le projet d'accès à l'énergie et au développement au Ghana (GEDAP) de 220 millions de dollars de la Banque mondiale qui se distingue comme l'un des efforts pionniers [9], visant à fournir un accès universel à l'énergie renouvelable grâce à des biens et services solaires autonomes [12]. En outre, en début 2023 et dans le cadre du programme African Energy Transition Catalyst (AETC), la Banque Africaine de Développement (BAD) a approuvé une subvention du Fonds pour l'énergie durable en Afrique d'un montant total de 7,88 millions dollars. Cette subvention est destinée à accélérer le développement des énergies renouvelables aux niveaux national et régional [13].

3.2. Diminution du prix des énergies renouvelables et des équipements

La baisse rapide des prix des systèmes photovoltaïques à l'échelle mondiale peut être attribuée à plusieurs facteurs clés, notamment l'avancement du niveau de préparation technologique et du niveau de préparation à la fabrication, couplé à une diminution du coût nivelé de l'électricité (LCOE). Ces facteurs ont rendu les technologies des énergies renouvelables, telles que l'éolien et le solaire, plus rentables par rapport aux technologies traditionnelles des combustibles fossiles, y compris le charbon [8].

Selon Lei et al. (2019), au cours de la dernière décennie, les progrès technologiques ont entraîné une baisse remarquable du prix moyen mondial des modules photovoltaïques d'un facteur 79, accompagnée d'une

augmentation substantielle de l'efficacité de 15 % à 25 %. Ces développements sont de bon augure pour la pénétration accrue de la technologie de l'énergie photovoltaïque dans le mix énergétique dans un proche avenir [14].

En outre, Louwen et al. (2016) ont analysé les données sur la production de modules PV en silicium cristallin (c-Si) de 1976 à 2015. Ils ont constaté qu'à chaque doublement de la capacité photovoltaïque installée, l'énergie nécessaire à la production de modules c-Si diminuait de 12 à 13 % et l'empreinte carbone de 17 à 24 %. Ce gain d'efficacité a contribué à une réduction annuelle moyenne des prix de 20,1 % pour les modules photovoltaïques [15].

4. Menaces

Cette section se penche sur les diverses menaces qui pourraient entraver la mise en œuvre réussie et la prolifération de l'énergie photovoltaïque dans la Tunisie.

La compréhension de ces menaces peut aider à formuler des stratégies pour surmonter ces défis.

4.1. Déficit en matière de compétences techniques et de renforcement des capacités

Le développement et l'intégration de systèmes photovoltaïques (PV) dans l'infrastructure énergétique de la Tunisie ne peuvent être réalisés qu'avec les compétences techniques requises. L'un des défis fondamentaux entravant l'adoption rapide de la technologie photovoltaïque dans le pays est la pénurie de techniciens, d'ingénieurs et de professionnels compétents dans la conception et la maintenance des systèmes d'énergie solaire [16].

Pour que les systèmes photovoltaïques fonctionnent de manière optimale, les installations doivent respecter des normes spécifiques et un entretien régulier est essentiel.

Cependant, dans de nombreuses régions de la Tunisie, il existe un déficit prononcé d'institutions et de programmes de formations spécialisés dans les technologies des énergies renouvelables. Ce déficit affecte non seulement la phase d'installation, mais aussi la phase opérationnelle, car les systèmes photovoltaïques mal installés ou mal entretenus peuvent souffrir d'inefficacités, réduisant leur puissance de sortie et leur durée de vie globale.

4.2. Instabilités économiques

Les instabilités économiques, particulièrement prononcées dans les pays en développement, ont des implications importantes pour l'adoption et la faisabilité des systèmes photovoltaïques. Un aspect critique de cette instabilité est la volatilité des devises. Au fur et à mesure que les monnaies locales fluctuent, en particulier en cas de baisse par rapport aux principales normes mondiales, les conséquences pour les énergies renouvelables deviennent claires. Les coûts d'importation des composants photovoltaïques essentiels peuvent augmenter considérablement. Ces coûts supplémentaires sont souvent répercutés sur les utilisateurs finaux, ce qui rend potentiellement les solutions d'énergies renouvelables plus coûteuses et moins attrayantes.

À mesure que les taux d'inflation augmentent, le pouvoir d'achat des résidents diminue, affectant divers secteurs de l'économie. Une inflation plus élevée peut augmenter les prix des biens, des services, de l'installation et de la maintenance des systèmes photovoltaïques locaux pour le secteur des énergies renouvelables. Les ménages et les entreprises, qui disposent déjà de ressources financières limitées, pourraient avoir du mal à allouer des fonds pour des solutions d'énergies renouvelables, qui, bien que prometteuses à long terme, nécessitent un investissement initial important.

Ces défis économiques influencent également le paysage du financement. Les institutions financières traditionnelles opérant dans cet environnement imprévisible pourraient adopter une approche plus prudente. En conséquence, les emprunteurs potentiels à la recherche de fonds pour des installations photovoltaïques pourraient être confrontés à des taux d'intérêt élevés, à des critères de prêt stricts et à des durées de prêt plus courtes, ce qui compliquerait l'aspect financier de l'adoption du système photovoltaïque [17].

IV. DISCUSSION

Les perspectives d'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le système énergétique de la Tunisie sont prometteuses, stimulées par plusieurs facteurs clés. Tout d'abord, la Tunisie bénéficie de ressources solaires abondantes, caractérisées par des niveaux élevés d'irradiation solaire, ce qui en fait un élément idéal pour produire de l'électricité propre grâce à des panneaux solaires. Cette abondance offre l'occasion de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'atténuer leurs coûts environnementaux associés, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus durable. De plus, les systèmes solaires photovoltaïques offrent la flexibilité d'une production

décentralisée, avec la possibilité d'être déployés à différentes échelles, allant des fermes solaires à grande échelle aux installations sur les toits des maisons et des entreprises. Cette approche décentralisée favorise non seulement la sécurité énergétique, mais étend également l'accès à l'électricité aux zones reculées qui ne sont pas connectées au réseau national.

Pour réaliser pleinement ces perspectives, il est essentiel de relever les défis liés à la stabilité du réseau, à l'équilibrage de l'offre et de la demande et à l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans l'infrastructure du réseau existant. Les technologies du réseau intelligent et les stratégies de gestion de la demande peuvent jouer un rôle crucial dans l'atténuation de ces défis et l'optimisation de la stabilité du réseau. La prise de décision et la planification stratégiques sont nécessaires pour assurer une intégration transparente de l'énergie solaire photovoltaïque à grande échelle dans le réseau.

V. CONCLUSION

Les défis et les perspectives des systèmes photovoltaïques (PV) dans la Tunisie sont caractérisés par un réseau complexe de considérations économiques, environnementales et de sécurité. Face à ces défis, il existe une voie à suivre qui capitalise le potentiel solaire abondant du pays tout en reconnaissant les obstacles nuancés à l'adoption. Les instabilités économiques soulignent la nécessité d'un financement innovant et d'un soutien politique pour rendre la technologie photovoltaïque accessible au milieu de la volatilité des devises et de l'inflation. Les facteurs environnementaux, en particulier les tempêtes de poussière et de sable, nécessitent un entretien robuste et des mesures de protection pour assurer la longévité et l'efficacité des installations solaires. Les questions de sécurité exigent une planification stratégique et des investissements dans la protection des infrastructures et du personnel impliqués dans le déploiement de solutions d'énergie solaire.

Dans l'ensemble, la voie à suivre pour le paysage de l'énergie solaire en Tunisie consiste à favoriser un environnement propice à l'adoption du photovoltaïque et à tirer pleinement du potentiel solaire du pays. En relevant les défis économiques, environnementaux et de sécurité, grâce à des efforts coordonnés, la Tunisie peut : transformer son secteur d'énergie, promouvoir le développement durable et améliorer la qualité de vie de ses résidents.

REFERENCES

- [1] YOUSSEF, Adel BEN. Vers un nouveau modèle économique fondé sur la croissance verte et le développement durable en Tunisie, 2023.
- [2] KARRA, Inès. Quels partenariats publics privés dans le domaine de l'environnement ? : le cas des énergies renouvelables en Tunisie.
- [3] DRIDI, Mohamed. La Tunisie et le développement durable. Espace Géographique et Société Marocaine, 2024, vol. 1, no 88.
- [4] SAAD, Myriam Ben, GNONLONFIN, Amandine, KHRAIEF, Naceur, et al. Les stratégies de développement des énergies renouvelables dans la région MENA: Etude comparative et couloirs de développement. 2021.
- [5] ZAFAR, Salman. Solar Energy Prospects in Tunisia. 2016.
- [6] BECHIR, Riadh. ENERGIE ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE, VERS UNE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE ACTIVE DE L'EMPLOI EN TUNISIE. *Revue Européenne du Droit Social*, 2018, no 4 (41), p. 67-74.
- [7] MLILO, Njabulo, BROWN, Jason, et AHFOCK, Tony. Impact of intermittent renewable energy generation penetration on the power system networks—A review. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 2021, vol. 6, no 1, p. 25.
- [8] MENU, Stéphanie, et al. Les Objectifs de Développement Durable de l'agenda 2030 de l'ONU (ODD)—Éducation au développement durable. 2023.
- [9] Oliver. La réforme du secteur de l'électricité au Ghana et en Tanzanie. *Afrique contemporaine*, 2017, vol. 261262, no 1, p. 25-48.
- [10] IRENA et AEA (2022), Analyse du marché des énergies renouvelables : l'Afrique et ses régions. Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables, Abou Dhabi.
- [11] Conférence des Nations unies sur le Commerce et le Développement – CNUCED (2013) « Le développement économique en Afrique – Commerce intra-africain : libérer le dynamisme du secteur privé », https://unctad.org/meetings/fr/SessionalDocuments/tdb60d4_fr.pdf (consulté le 12 septembre 2023).
- [12] Mondiale, Banque. "Rapport annuel." 2015.
- [13] Banque Africaine de Développement – BAD (2022) « Indice 2022 de l'Industrialisation en Afrique », rapport disponible en ligne : <https://www.afdb.org/fr/documents/indice-2022-de-lindustrialisation-enafrrique> (consulté le 12 septembre 2023).

- 2023).LAVILLE, Bettina. Cinquante années de tentatives de gouvernance pour un développement plus durable. *Revue française d'administration publique*, 2022, no 2, p. 565-576.
- [14] LEI, Yu, LU, Xi, SHI, Mai, *et al.* SWOT analysis for the development of photovoltaic solar power in Africa in comparison with China. *Environmental Impact Assessment Review*, 2019, vol. 77, p. 122-127.
- [15] LOUWEN, Atse, VAN SARK, Wilfried GJHM, FAAIJ, André PC, *et al.* Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development. *Nature communications*, 2016, vol. 7, no 1, p. 13728.
- [16] AMIR, Mohammad et KHAN, Sana Zubair. Assessment of renewable energy: Status, challenges, COVID-19 impacts, opportunities, and sustainable energy solutions in Africa. *Energy and Built Environment*, 2022, vol. 3, no 3, p. 348-362.
- [17] HAFNER, Manfred et TAGLIAPIETRA, Simone. *The geopolitics of the global energy transition*. Springer Nature, 2020.
- [18] IRENA. (2023). Renewable Energy Statistics 2023. International Renewable Energy Agency (IRENA).
- [19] DELLALY, Mariem, SKANDER-MUSTAPHA, Sondes, et SLAMA-BELKHODJA, Ilhem. Optimization of a residential community's curtailed PV power to meet distribution grid load profile requirements. *Renewable Energy*, 2023, vol. 218, p. 119342.
- [20] YOUSSEF, Adel BEN. Vers un nouveau modèle économique fondé sur la croissance verte et le développement durable en Tunisie. 2023.
- [21] GAETA, Francesco. L'Accord de Paris : un outil indispensable pour contrer les changements climatiques dont la mise en œuvre doit être accélérée. *Administration*, 2024, no 2, p. 19-21.
- [22] DEMRAOUI, FATIMA ZOHRA, AMHAMDI, LATIFA, HARROUZ, Abdelkader, *et al.* Analyse et efficacité des projets d'énergies renouvelables : photovoltaïque et éolienne avec RET Screen. 2023. Thèse de doctorat. UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR.
- [23] BEN ABDESSALEM, Wahiba, JAYARI, Ilyes, et KARAA, Sami. Climate Change: The Challenge of Tunisia and Previsions for Renewable Energy Production. In *The Power of Data : Driving Climate Change with Data Science and Artificial Intelligence Innovations*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. p. 99-115.