

Solar photovoltaic in Algeria: A comparative and sustainable energy vector

-Adjout Abdelkader¹: MAA, University of Chlef, Algeria

-Bendib Youcef²: MCA, ENSA, Algeria

Received:16/12/2021

Accepted :14/01/2022

Published :31/01/2022

Abstract:

Climate change and the decline of fossil reserves are two major issues facing the world. To face this double challenge, an energy transition is inevitable. Photovoltaic solar energy and its corollary hydrogen, appear to be the cornerstone of this transition, both for costs, which fell by 85% between 2010 and 2020, and for availability, which is unlimited for photovoltaics. For the latter, the IEA expects annual growth of 21% between 2020 and 2030. The objective of this article is to highlight the comparative advantages of this energy vector through a technical and economic analysis of the sector. and feedback from Germany, a leading country in this area. This study leads to the conclusion that decentralized photovoltaic electricity offers Algeria exceptional economic opportunities to cover its energy needs and achieve significant savings in natural gas and fuels, with medium-term export prospects of electricity and gas, and in the long-term hydrogen, a future ecological substitute for natural gas.

Key words: Energy transition, Solar photovoltaic, renewable energies, natural gas, green hydrogen, climate change.

Jel Codes Classification : Q2, Q3, Q4

1 - **Adjout Abdelkader**, L of Financial and banking systems and macroeconomic politics in the face of international fluctuation , a.adjout@univ-chlef.dz

2 - y.bendib@ensa.dz

Le solaire photovoltaïque en Algérie : un vecteur énergétique compétitif et durable

□ الفولطاضوئية الشمسية في الجزائر: حامل طاقي تنافسي ومستدام



-Adjout Abdelkader¹: MAA, Université Hassiba Ben Bouali-Chlef- Algérie

-Bendib Youcef: MCA, École Nationale Supérieure d'Agronomie, Algérie

Recever:16/12/2022

Acceptor :14/01/2022

Publier :31/01/2022

ملخص

يواجه العالم رهانين رئيسيين، تغير المناخ وتراجع الاحتياطات الأحفورية للطاقة. ولمواجهة هذا التحدي المزيج يتحتم الانتقال الطاقي. تمثل الطاقة الشمسية الضوئية وما يترتب عليها من إنتاج للهيدروجين الحجر الأساس لهذا الانتقال، سواء فيما يتعلق بالتكاليف التي انخفضت بـ 85% ما بين 2010 و 2020 أو الوفرة غير المحدودة للطاقة الفولطاضوئية. هذه الأخيرة التي يقدر أنها ستحقق نسبة نمو بـ 21% ما بين 2020 و 2030 حسب توقعات الوكالة الدولية للطاقة. إن الهدف من هذا المقال هو تسليط الضوء على المزايا النسبية لهذا الحامل للطاقة من خلال تحليل تقني اقتصادي لهذا الفرع والعودة إلى التجربة الألمانية التي تعتبر رائدة في هذا المجال. من خلال هذه الدراسة خلصنا إلى أن إنتاج الكهرباء الفولطاضوئية اللامركزية تتيح للجزائر فرصا اقتصادية استثنائية من أجل تغطية احتياجاتها الطاقوية، تحقيق وفورات كبيرة للغاز الطبيعي والوقود، وتفتح آفاقا لتصدير كل من الكهرباء على المدى المتوسط، والهيدروجين الذي يعتبر البديل البيئي المستقبلي للغاز الطبيعي على المدى الطويل .

الكلمات المفتاحية: الانتقال الطاقي، الفولطاضوئية الشمسية، الطاقات المتجددة، الغاز الطبيعي، الهيدروجين الأخضر، تغير المناخ.

التصنيف JEL: Q2, Q3, Q4

Résumé

Le changement climatique et le déclin des réserves fossiles sont deux enjeux majeurs auxquels le monde est confronté. Pour faire face à ce double défi, une transition énergétique est inéluctable. Le solaire photovoltaïque et son corollaire l'hydrogène, apparaissent comme la pierre angulaire de cette transition, aussi bien pour les coûts qui ont baissé de 85% entre 2010 et 2020 que pour la disponibilité qui est illimitée pour le photovoltaïque. Pour ce dernier, l'AIE s'attend à une croissance annuelle de 21% entre 2020 et 2030. L'objectif de cet article est de mettre en évidence les avantages comparatifs de ce vecteur énergétique à travers une analyse technico-économique de la filière et le retour d'expérience de l'Allemagne, pays leader en la matière. Cette étude permet de conclure que l'électricité photovoltaïque décentralisée, offre à l'Algérie des opportunités économiques exceptionnelles, pour couvrir ses besoins énergétiques et réaliser d'importantes économies de gaz naturel et de carburants, avec des perspectives d'exportation à moyen terme de l'électricité et du gaz, et à long terme de l'hydrogène, futur substitut écologique du gaz naturel.

Mots clé : transition énergétique, solaire photovoltaïque, énergies renouvelables, gaz naturel, hydrogène vert, changement climatique.

JEL Codes Classification: Q2, Q3, Q4

Keywords : Energy transition, Solar photovoltaic, renewable energies, natural gas, green hydrogen, climate change.

Introduction

La croissance accrue et régulière de la consommation des énergies fossiles est responsable du changement climatique actuel, qui se traduit par des événements extrêmes : épisodes répétés de sécheresse, fortes températures, inondations, etc.... Ces perturbations ont entraîné de graves bouleversements des conditions de vie de centaines de millions de personnes. Le changement climatique a été confirmé par le sommet mondial de Rio de Janeiro sur le climat en juin 1992 ; à travers les 27 principes énoncés, les 165 Etats signataires se sont engagés à lutter contre l'émission de gaz à effet de serre dans le cadre d'une convention internationale visant à contenir le réchauffement anthropique entre 1,5°C et 2°C par rapport aux moyennes préindustrielles, et atteindre la neutralité carbone en 2050. Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) estime à 800 milliards de dollars les investissements annuels supplémentaires dans le secteur de l'énergie jusqu'en 2050 pour arriver à limiter le réchauffement à 1,5°C. Les différentes conférences des parties (COP) organisées sous l'égide de l'ONU depuis cette date, témoignent de l'inquiétude grandissante des pays signataires de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) (Nations Unies, 1992). La compagnie d'assurance AXA (2021) rapporte que des experts de 60 pays, ont classé le changement climatique au premier rang des risques émergents dans les cinq à dix prochaines années ; les risques de stabilité financière et les risques macroéconomiques, n'arrivant qu'à la 8^{ème} et la 9^{ème} position.

La stratégie mondiale de lutte contre le réchauffement climatique préconise une transition énergétique visant à réduire drastiquement l'utilisation des énergies fossiles au profit des énergies renouvelables ; la large disponibilité de ces dernières, en particulier le solaire, est très favorable à leur développement. Cette tendance s'affirme de plus en plus à travers les importants investissements des grandes compagnies d'hydrocarbures dans les énergies renouvelables, et leur hésitation à poursuivre l'exploration de nouvelles ressources fossiles. Il en est de même pour certaines banques, qui commencent à réduire le financement des investissements liés aux énergies fossiles au profit des énergies renouvelables. En fait, le risque climatique est perçu actuellement comme un risque financier par les grands acteurs des énergies fossiles. La baisse de 89% des coûts de l'énergie solaire photovoltaïque durant la dernière décennie confirme la progression de sa compétitivité ; ce qui va booster davantage la transition énergétique. Pour avoir un aperçu de cette tendance, notons qu'en 2020, 43 % de toutes les nouvelles capacités électriques ajoutées au réseau américain provenaient de l'énergie solaire. Jusqu'en 2019, les principales entreprises utilisatrices de l'énergie solaire aux Etats-Unis (Apple, Amazon, Google...) ont installé 8300 MW de capacité. (SEIA, 2021).

L'Algérie, pour sa part, a ratifié en 2015 l'accord de Paris (COP21) sur la réduction de l'émission des gaz à effet de serre et la lutte contre le réchauffement climatique ; elle s'est engagée à réduire de 7% ses émissions de carbone à l'horizon 2030, et même jusqu'à 22% au cas où elle bénéficierait d'une aide financière et technologique. Le solaire photovoltaïque permet à l'Algérie de participer à cet effort mondial de réduction du CO₂ tout en économisant substantiellement ses énergies fossiles. De par sa position géographique privilégiée, l'Algérie a le potentiel de se transformer en un hub énergétique de classe mondiale, car elle a la chance de disposer d'un des plus grands gisements solaires de la planète. L'immensité de son territoire est un atout majeur pour le développement de parcs solaires photovoltaïques, d'autant plus que les besoins en maintenance et en entretien des centrales solaires photovoltaïques sont relativement faibles par rapport à d'autres technologies de production d'énergie ; ce qui assurera à notre pays une alimentation électrique, fiable, durable, à prix compétitifs et lui permettra de réorienter ses ressources gazières vers des usages à plus forte valeur ajoutée. Le transport de l'électricité photovoltaïque à courant continu à haute tension (HVDC) par câble sur de longues distances, sans pertes notables, est une opportunité pour l'exportation de cette énergie au même titre que le gaz naturel ou le pétrole. Déjà, des

initiatives de ce genre ont fait leur apparition, comme le projet de liaison sous-marine par câble du Maroc à la Grande-Bretagne sur 3800 Km, en vue de la livraison de 10,5 GW d'électricité issue des énergies renouvelables, pour alimenter 7 millions de foyers britanniques (Photon.info, 2021).

Cependant, il faut souligner que, sans les importantes subventions allouées par les Etats, les tarifs préférentiels (accords d'achat d'énergie sur 10 à 25 ans), et les autres incitations fiscales, les énergies renouvelables n'auraient jamais pu décoller. Par exemple, les réglementations de la directive européenne sur les énergies renouvelables, exclut l'imposition de frais et de taxes sur l'autoconsommation des installations photovoltaïques jusqu'à 30 kW. En fait, le volet des subventions pose le problème de la pérennité de la politique actuelle des aides publiques et la capacité des innovations technologiques à améliorer la compétitivité du solaire photovoltaïque pour pouvoir entrer en concurrence libre avec les autres formes de production de l'électricité. Un autre élément problématique est l'intermittence de la production électrique du photovoltaïque qui constitue un obstacle pour son exploitation de manière continue. Bien que le stockage par batteries de cette forme d'énergie soit la solution en vigueur, il n'en demeure pas moins qu'elle grève la compétitivité de cette filière.

L'objectif de cet article est de prouver la viabilité et la pertinence économique et écologique de la production d'électricité photovoltaïque en Algérie, à travers le couplage des nouvelles centrales solaires photovoltaïques aux centrales à gaz en activité, pour pallier au phénomène d'intermittence. L'analyse technico-économique présentée à cette fin, s'appuie sur la contribution des technologies récentes dans la réduction des coûts de l'électricité photovoltaïque, le retour d'expérience d'un pays modèle, à savoir l'Allemagne, les atouts naturels considérables de notre pays, ainsi que les anticipations des grands acteurs du secteur énergétique. L'hypothèse fondamentale de ce travail considère comme données de base l'état actuel du niveau de la technologie et les implications des contraintes liées aux engagements internationaux d'abandonner les énergies fossiles à l'horizon 2050. La deuxième section présente la technologie du solaire photovoltaïque avec les plus récentes innovations, la troisième section traite de la situation actuelle de la filière du solaire photovoltaïque à travers le monde, la quatrième section expose le cas de l'Allemagne, un pays locomotive en matière d'efforts dans le développement des énergies renouvelables et de son « sacrifice » du nucléaire. La cinquième section se focalise sur les perspectives du développement du solaire photovoltaïque en Algérie. La sixième et dernière section présente la conclusion de l'article et les recommandations.

I- La technologie du solaire photovoltaïque

La source primaire de l'électricité photovoltaïque est le soleil, qui produit 7×10^{17} kWh/an ; son noyau est le siège de réactions nucléaires de fusion où près de 700 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en 695 millions de tonnes d'hélium, et 5 millions de tonnes d'énergie sous forme de rayons gamma en une seconde (Planetoscope-Statistiques, 2012). Une partie du rayonnement solaire captée par la terre est exploitée par l'homme pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité (photovoltaïque). On estime que la quantité d'énergie solaire reçue en une heure par notre planète suffirait à couvrir les besoins annuels de la population mondiale ; ce qui est réalisable théoriquement en exploitant 100 000 km² (soit 4,6% de la superficie du Sahara algérien) en panneaux photovoltaïques tout en évitant 10 milliards de tonnes d'émission de CO₂ (Futura sciences, 2001). On estime qu'un mètre carré de cellules photovoltaïques produit environ 130 kWh par an en Algérie, et réduit l'émission d'au moins 100 Kg de CO₂ dans l'atmosphère (Planetoscope, 2012).

I-1- Principe de génération de l'électricité photovoltaïque

L'unité de base de production de l'électricité photovoltaïque est une cellule solaire qui absorbe de l'énergie lumineuse pour la transformer directement en courant électrique continue (puissance électrique de 1 à 3 W et une tension de moins d'un volt). Précisément, une cellule solaire est un composant électronique de deux couches de matériau photosensible (épaisseur 0,2 mm) ; une couche active (absorbeur) d'un semi-conducteur receveur d'électrons (généralement du silicium dopé avec des atomes de bore pour une polarité positive) ; une seconde couche, également constituée d'un matériau semi-conducteur fournisseur d'électrons (généralement du silicium dopé avec des atomes de phosphore pour une polarité négative). En raison de leur fragilité, les cellules sont protégées sur la face avant par un verre très résistant (~5 mm d'épaisseur) et sur la face arrière par un revêtement en polymère pour assurer l'étanchéité et éviter l'oxydation. En percutant avec une certaine énergie la couche active de la cellule, les photons solaires vont détacher des électrons du silicium ; ces derniers se déplacent vers la couche de silicium dopé avec du bore, créant un courant électrique transmis par une grille métallique très fine. Pour produire plus de puissance, les cellules photovoltaïques sont interconnectées et assemblées pour constituer des panneaux solaires (1,70m x 1m) de 36 à 120 cellules ; par exemple, un panneau de 24 volts est composé de 72 cellules. La puissance générée est proportionnelle à la surface du panneau photovoltaïque. L'électricité produite va être accumulée dans des batteries ou injectée dans le réseau public après avoir été transformée en courant alternatif par le biais d'un onduleur (Planète énergie, 2014). Pour améliorer le rendement et les performances d'une cellule photovoltaïque on rajoute des couches supplémentaires pour avoir une meilleure absorption de la lumière et une meilleure diffusion des électrons de conduction dans le matériau semi-conducteur. En fait, c'est la nature de la couche active qui est l'élément le plus impactant dans une technologie photovoltaïque.

La caractéristique la plus importante d'une cellule photovoltaïque est son rendement (exprimé en pourcentage) ; c'est le rapport entre l'énergie électrique (en kW) produite par cette cellule et l'énergie lumineuse (en kW) reçue par la surface irradiée (IFC, 2015). Comme l'énergie varie suivant l'endroit, la période d'exposition, et les conditions environnementales, le rendement est défini de manière standard comme étant le rendement obtenu dans des conditions de production précises, dites conditions STC (Standard Test Conditions), à savoir : irradiation solaire de 1 000 W/m², température de la cellule 25 °C, angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale à travers un ciel parfaitement dégagé. Théoriquement, le rendement est optimal en un lieu, lorsque les rayons du soleil tombent perpendiculairement sur la surface de la cellule. La hausse de la température dégrade le rendement d'une cellule solaire ; une augmentation d'un degré au-delà de 25°C, provoque une chute de l'ordre de 0,5% du rendement de la cellule par rapport à son rendement sous STC ; c'est ce qu'on appelle le « coefficient de température » (exprimé en % par °C). Plus ce coefficient est faible, plus le panneau solaire est fiable (Energie, 2021).

Le même problème de variabilité se pose pour la puissance d'une installation. Ainsi, on définit la « puissance crête » ou « puissance nominale » pour désigner la puissance maximale délivrée au réseau électrique sous les conditions STC. En pratique, cette puissance idéale n'est presque jamais atteinte en raison des conditions climatiques (températures, nuages, poussières, qui réduisent l'irradiation solaire). Par ailleurs, il est important de distinguer le rendement commercial du rendement de laboratoire d'un panneau ; le premier, qui est nettement inférieur au second, est celui qui nous intéresse dans ce travail.

I-2- Les technologies photovoltaïques de production de masse

La demande du solaire photovoltaïque concerne l'électricité produite par cette source d'énergie pour les usages courants de masse (activités domestiques, industries, etc...).

L'activité de la recherche dans ce domaine vise essentiellement la fabrication à moindre coût de cellules photovoltaïques à rendement maximal, avec une garantie de fiabilité des performances, à long terme. La plus ancienne technologie de masse de la filière photovoltaïque est celle des cellules au silicium monocristallin et polycristallin (cellules c-Si solaires de première génération) ; elle remonte aux années cinquante du siècle dernier. Actuellement, elle est la plus répandue dans le monde (90% des parts de marché dont 56 % pour le polycristallin) avec des rendements de plus de 20% et une durée de vie des modules photovoltaïques de 30 ans (Photovoltaïque.info, 2020).

Complexe et coûteuse, la fabrication de la cellule au silicium monocristallin est réalisée à partir d'un seul cristal en silicium. Son rendement varie entre 16% et 24%, et exige un éclairage solaire important, mais la hausse de la température fait décroître son rendement (forte baisse à partir de 60°C). Les panneaux monocristallins sont plus performants (150Wc/m²) que les panneaux polycristallins, ce qui permet un gain en surface de panneaux. La cellule au silicium polycristallin est fabriquée à partir de cristaux multiples ; elle affiche un rendement entre 12% et 15%, et une puissance de 100Wc/m², avec une sensibilité à la hausse des températures moindre que le monocristallin. Actuellement, cette catégorie de cellule présente le meilleur rapport qualité/prix. Ainsi, les pays à fortes irradiances solaires, comme l'Algérie, ont un intérêt économique à utiliser ce genre de panneaux qui sont moins chers. Les cellules solaires fabriquées à partir du silicium cristallin (c-Si) sont des cellules à simple jonction et sont généralement plus efficaces que les cellules solaires à couche mince de deuxième génération (Tellurure de cadmium CdTe, Silicium amorphe a-Si et Cuivre Indium Gallium Sélénium CIGS) (Wikipédia, 2021).

Bien que le silicium soit très abondant dans la nature (27,7 % de la masse de la croûte terrestre) sous forme d'ions tétraédriques [SiO₄]⁴⁻, son affinage et sa transformation en silicium métal pour la fabrication de cellules photovoltaïques est un procédé très complexe et très énergivore (Mineralinfo, 2020). Les capacités mondiales installées en 2019 pour la production du silicium métal étaient de l'ordre de 6 millions de tonnes, dont 80% sont localisées en Chine. Cette dernière en est le plus grand producteur avec 2,2 millions de tonnes, soit 71% des 3,1 millions de tonnes du total mondial, suivie par la Norvège et le Brésil avec 6%, les USA avec 4%, et la France avec 3%. Mais, il faut noter que seule 18% de cette production est utilisée pour les cellules solaires et 1% pour la microélectronique ; le reste est partagé par les alliages en aluminium (43%) et les silicones et silanes (37%). En 2020, Hoschine Silicon, leader chinois du silicium métal, a annoncé un mégaprojet de 800000 tonnes dans le Yunnan. La politique de surcapacité suivie par la Chine est une stratégie pour dominer l'industrie du silicium, en étant prête à répondre sans délai à toute demande de silicium métal à travers le monde. Dans le registre des fabricants des panneaux photovoltaïques les plus performants, on dénombre en 2020 plus de 10 fabricants qui ont réalisé des rendements supérieurs à 21 %.

Tableau n°1 : Meilleurs rendements des panneaux photovoltaïques

Fabricant	Rendement	Puissance fournie	Fabricant	Rendement	Puissance fournie
SunPower	22.80%	425 W	Canadian Solar	21.40%	665 W
LG Solar	22.30%	405 W	Silfab Solar	21.40%	380 W
REC Group	21.90%	405 W	JA Solar	21.30%	550 W
Panasonic	21.70%	380 W	Risen Energy	21.30%	410 W
Upsolar	21.60%	560 W	Seraphim	21.13%	540 W
LONGi	21.50%	550 W	Jetion	21.10%	545 W

Source : <https://www.solarreviews.com/blog/what-are-the-most-efficient-solar-panels>

Les panneaux chinois sont en moyenne 30% moins chers que leurs homologues européens, pour les mêmes performances et qualité. LONGi Solar, Canadian Solar, Trina Solar, Jinko Solar, GCL Group, Risen Energy, est le groupe chinois qui domine actuellement le marché mondial de la filière photovoltaïque. LONGi, qui n'a été créé qu'en 2000, est devenue leader mondial de la technologie solaire monocristalline (cellules PERC : Passivated Emitter Rear Contact, à haut rendement). En juillet 2021, elle enregistra un record mondial de 25,21 % pour ses cellules solaires monocristallines bifaces TOPCon de type N. Ce record a été validé par l'Institut allemand für Solarenergieforschung (ISFH), tout comme son record de 25,26% d'efficacité de conversion d'une cellule solaire monocristalline HJT (à hétérojonction) de taille commerciale ; des prouesses techniques qui hissent cette entreprise aux premières loges de la technologie liée aux cellules HJT. Sur le plan de la production de panneaux photovoltaïques, LONGi s'est arrogée un nouveau record en 2020 en tant que première compagnie à dépasser les 20 GW (PR Newswire, 2021).

La technologie du solaire photovoltaïque enregistre chaque jour des avancées remarquables, du point de vue performances techniques et réduction de coûts de production de l'électricité. Ainsi, la société anglaise OXFORD PV développe actuellement la technologie de cellules solaires tandem pérovskite-silicium qui captent le rayonnement visible et invisible de la lumière ; une combinaison qui permet d'améliorer considérablement les performances des cellules au silicium, atteignant un rendement de l'ordre de 30%, avec une réduction importante du coût de production du Kwh. Mais c'est une technologie qui n'a pas encore atteint le stade de production de masse. Oxford PV va installer sa première unité de fabrication commerciale de 125 MW pour les cellules tandem c-Si/pérovskite en Allemagne, et les premières ventes sont prévues en 2022. Les cellules solaires multijonctions III-V font actuellement l'objet de recherches très actives pour réduire les coûts des matériaux et de fabrication, et pour améliorer les méthodes de concentration utilisées. Les dispositifs à multijonctions exploitent les propriétés des semi-conducteurs des éléments comme le phosphate de gallium-indium (GaInP), l'arséniure de gallium-indium (GaInAs) et l'arséniure de gallium (GaAs). Les dispositifs à trois jonctions III-V ont atteint des rendements supérieurs à 45 % en utilisant la lumière solaire concentrée (Solar Energy Technology Office, 2021). En juin 2021, la Startup polonaise Saule Technologies a réussi la production industrielle et la commercialisation de modules solaires en pérovskites, composés de cellules solaires à base de pérovskites, ultra-fines, flexibles, avec un système d'impression à jet d'encre. Ces modules peuvent être posés sur les surfaces des bâtiments, des voitures, etc.... pour un coût de fabrication nettement inférieur à celui des cellules classiques au silicium, et avec des rendements de même ordre, ou plus (Révolution énergétique, 1 septembre 2021).

Des chercheurs de l'université norvégienne de science et technologie ont proposé récemment une nouvelle méthode de fabrication de cellules solaires avec un rendement de 40% et un faible coût (un record du rapport de puissance/poids de 560W/g). Le procédé est une double cellule en tandem : une couche d'arséniure de gallium à nanofils au-dessus et une cellule classique en silicium (Si) en-dessous. Le gain c'est l'utilisation d'une très petite quantité d'arséniure de gallium (10000 fois moins de matière) dans une structure de nanofils légers (diamètre 10^{-6} mm) ; un procédé qui permet de capter entre 12 et 15 fois plus d'énergie lumineuse qu'une cellule conventionnelle. (Nathalie Mayer, 11 Novembre 2021).

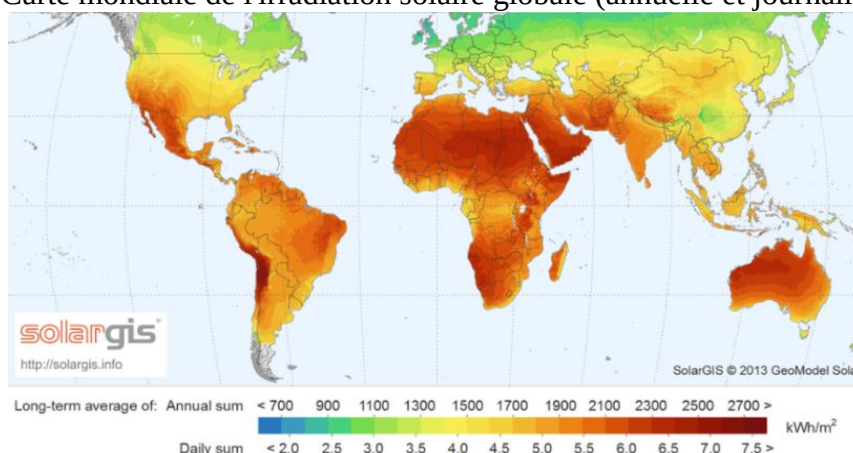
En dépit de ces innovations technologiques accélérées, deux obstacles persistent encore et pénalisent la productivité de cette filière, à savoir l'intermittence et le facteur de charge. L'intermittence c'est le phénomène des arrêts de production de l'électricité en cas d'absence du soleil (la nuit par exemple). Le facteur de charge désigne le rapport entre l'énergie produite réellement par une installation électrique durant une année et l'énergie qu'elle aurait pu produire si elle avait fonctionné régulièrement avec sa puissance maximale. En fait, il serait illusoire de croire à un fonctionnement optimal régulier. Pour pallier à ces

insuffisances et bénéficier de la synergie avec les énergies fossiles, le maintien des capacités actuelles de production d'électricité des centrales fonctionnant au gaz naturel en Algérie, est impératif. Ces dernières sont très flexibles et nécessitent très peu de temps pour démarrer, à l'inverse des centrales à charbon.

II - Situation de la filière du solaire photovoltaïque

Les pays les plus favorisés géographiquement par l'abondance de l'énergie solaire sont ceux qui sont situés entre les tropiques du Cancer et du Capricorne (121 pays, avec une moyenne de 300 jours d'ensoleillement par an). On estime théoriquement, qu'une surface de 100 000 km² de panneaux photovoltaïques pourrait couvrir les besoins mondiaux en électricité. Ainsi, la Wilaya de Tamanrasset, avec une superficie de 557 906 km², une densité de population de 0,32 ha/km² et une irradiation solaire de 7,26 KWh/m² est théoriquement en mesure de satisfaire les besoins de notre pays et des pays limitrophes en énergie électrique.

Figure n°1: Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne).



Comme le montre cette carte, le territoire algérien est situé dans une zone à très fort taux d'irradiation solaire.

II-1- Capacités installées

Figure n°2 : Capacités annuelles installées du solaire photovoltaïque sur la période 2000-2020



La figure 2 montre que le photovoltaïque n'a pris de l'importance qu'à partir de 2010, où la part de la Chine était dérisoire par rapport à l'Europe ; mais trois années après, la Chine s'est imposée comme leader mondial dans ce domaine. De toutes les énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque et l'éolien présentent les meilleures perspectives de développement à

travers le monde, du fait de leur large disponibilité. Depuis 2009, le taux de croissance annuelle penche nettement en faveur du solaire photovoltaïque, comme le montre le tableau 2.

Tableau n°2: Capacités installées fin 2020 du photovoltaïque et de l'éolien en Gigawatt crête

	Capacités installées photovoltaïque	Croissance moyenne annuelle 2009 – 2019 du photovoltaïque	Capacités installées Eolien	Croissance moyenne annuelle 2009 – 2019 de l'éolien
Chine	253,8	85,9%	282,0	28,1%
Etats-Unis	73,8	47,8%	117,7	11,7%
Japon	67,0	37,2%	4,2	6,6%
Allemagne	53,8	16,6%	62,2	9,0%
Inde	39,0	97,1%	38,6	13,1%
Italie	21,6	32,4%	10,8	8,1%
Australie	17,6	44,7%	9,5	15,4%
Viet Nam	16,1	106,3%	†*	
Corée du Sud	14,6	35,0%	1,6	15,7%
Grande Bretagne	13,6	86,0%	24,7	18,5%
Espagne	11,8	10,1%	27,1	2,9%
France	11,7	44,2%	17,4	13,6%
Hollande	10,2	59,1%	6,6	7,3%
Algérie	0,4		†	
Total Asie Pacifique	422,6	54,9%	341,9	23,0%
Total Europe	167,8	24,1%	216,6	10,3%
Total Amérique du Nord	82,6	48,2%	139,4	12,5%
Total Amérique Centrale et Amérique du Sud	15,1	67,4%	26,4	35,2%
Total Afrique	9,5	54,5%	6,5	23,1%
Total Moyen Orient	6,5	62,7%	0,9	22,5%
Total Russie et CEI	3,2	110,6%	1,5	41,7%**
Total Monde	707,5	38,3%	733,3	15,3%

Source: IRENA (2021) Renewable capacity 2021 International Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi

* † signifie une puissance de moins que 0.05 Gw

** Total CIS : 2010 : † ; 2011 : † ; 2012 : † ; 2013 : † ; 2014 : 0.1 ; 2015 : 0.1 ; 2016 : 0.1 ; 2017 : 0.2 ; 2018 : 0.3 ; 2019 : 0.5 ; 2020 : 1.5 (2010 à 2020)

Ce tableau suggère les remarques suivantes :

- Les capacités mondiales installées du photovoltaïque et de l'éolien jusqu'en 2020 sont du même ordre (707,5 GW et 733,3 GW). Mais la croissance du photovoltaïque entre 2009 et 2019 est nettement plus prononcée que celle de l'éolien, soit 38,3% contre 15,3%. Il faut donc s'attendre à une domination du solaire par rapport à l'éolien dans les années à venir.
- La Chine, où le charbon représente 60% de sa consommation d'énergies, est le pays leader du solaire photovoltaïque, puisqu'il est le premier marché et le plus grand fabricant des panneaux et cellules solaires, des éoliennes et des véhicules électriques. 14,3% de l'énergie consommée par la Chine provient désormais de sources renouvelables. Mais tout récemment, avec la hausse des prix du gaz et du pétrole en octobre 2021, la consommation de charbon en Chine s'est accrue sensiblement (The Associated Press, 2019). En Chine, le prix de référence du solaire photovoltaïque, obtenu avec des modules

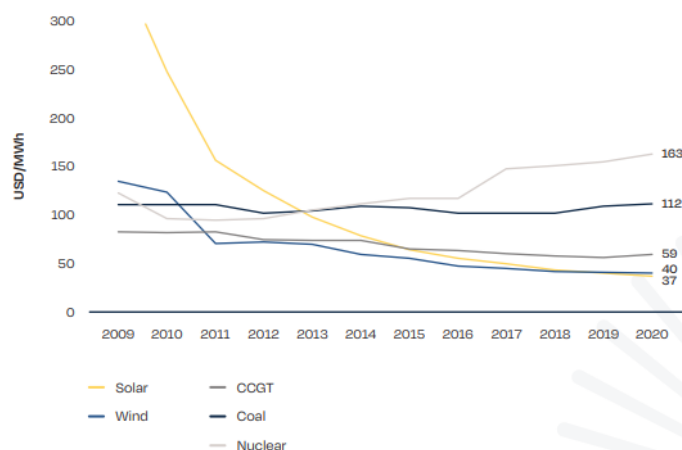
monocristallins est de 38 \$/MWh ; il avoisine ainsi le prix 35 \$/MWh de l'électricité issue des centrales à charbon (Renewable Energy World, 2020).

- Le Viet Nam et l'Inde sont les pays qui ont enregistré la plus forte croissance de capacités installées durant la période 2009-2019 avec 106,3% et 97,1% respectivement. Soulignons que l'éolien n'a pas connu au Viet Nam un développement significatif, alors qu'en Inde sa croissance a été modérée (13,1%). Cependant, le Viet Nam projette une capacité éolienne de 11800 MW à l'horizon 2025.
- La grande majorité des pays bénéficiant des meilleures conditions naturelles en termes d'ensoleillement et d'espaces, sont pratiquement absents du gotha mondial du photovoltaïque.

II-2- Compétitivité du solaire photovoltaïque

Depuis 2020, on s'accorde à dire que les nouvelles centrales solaires à grande échelle en Europe sont désormais compétitives par rapport aux actuelles centrales électriques fonctionnant au charbon et au gaz naturel. Plus généralement, le solaire photovoltaïque et l'éolien terrestre sont actuellement les nouvelles sources de production les moins chères pour au moins les deux tiers de la population mondiale (ayant 71 % du PIB mondial et 85 % de la production d'énergie). Les projets du solaire photovoltaïque les moins chers qui ont été financés fin 2019 début 2020, avec des rendements compétitifs, sont localisés en Chine, Australie, Chili, Emirats arabes unis. On s'attend à des LCOE (Levelized Cost of Energy ou coût actualisé de l'énergie) qui se situeraient entre 23 et 29 \$US/MWh (Renewable Energy World, 2020). *« De 2010 à 2020, le coût de l'électricité a baissé de 85 % pour le solaire photovoltaïque à échelle industrielle, 68 % pour le solaire thermique à concentration (CSP), 56 % pour l'éolien terrestre et 48 % pour l'éolien offshore. Avec des prix d'enchères record autour de 30 \$US/MWh, les prix du solaire photovoltaïque et de l'éolien terrestre actuels sont continuellement plus bas que celui des nouvelles options au charbon les moins chères sans aucun soutien financier. »* (IRENA, 2021).

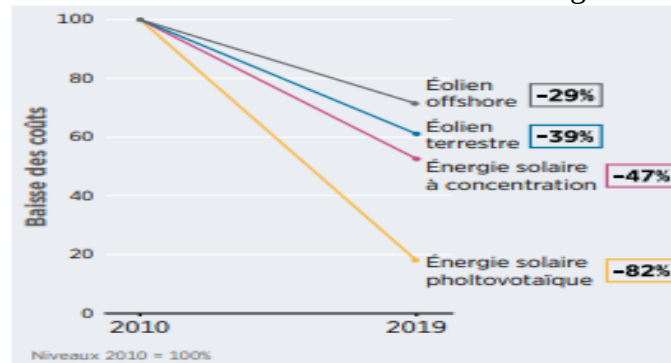
Figure n°3: Evolution des coûts actualisés (LCOE) du solaire, de l'éolien, du charbon du nucléaire, et du cycle combiné CCGT (Combined Cycle Gas Turbine)



Source: Lazard (2020). Historical mean unsubsidised LCOE values (nominal terms, post-tax)

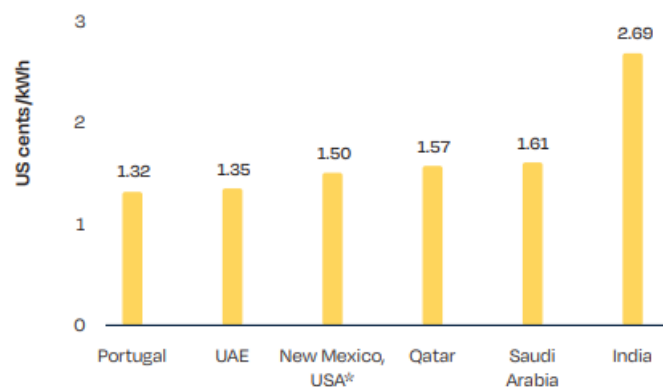
Les innovations technologiques des deux dernières décennies, conjuguées aux mesures d'aides publiques, ont entraîné des réductions spectaculaires des coûts de production des énergies renouvelables. Cette tendance se renforcera davantage dans le futur car il y'a un consensus mondial sur la nécessité absolue de réduire drastiquement la consommation des énergies fossiles, source majeure du dérèglement climatique actuel.

Figure n°4: Tendence de la baisse des coûts des énergies renouvelables



La figure 4 montre une décroissance hyperbolique du coût du solaire entre 2010 et 2020, tandis que les autres formes d'énergie ont connu des tendances modérées, soit en hausse ou en baisse. En 2020, le coût actualisé (LCOE) du MWh du solaire est le plus bas avec 37 \$US/MWh. Selon les analystes de Bloomberg New Energy Finance, les projets les moins coûteux financés en Australie, en Chine, au Chili et aux Émirats Arabes Unis, au cours des six derniers mois, ont atteint un LCOE compris entre 23 et 29 \$/MWh. Les meilleurs projets solaires et éoliens produiront de l'électricité pour moins de 20 \$/MWh d'ici 2030.

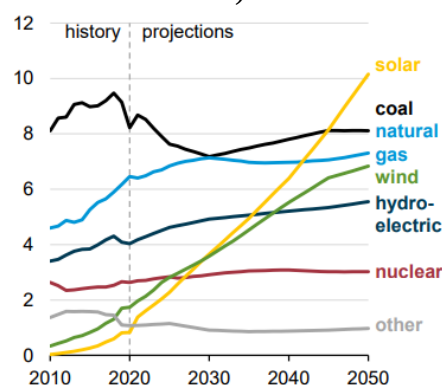
Figure n°5: Les enchères du solaire les moins chères en 2020



Source : Solarpower Europe 2021

Les offres record attribuées au Portugal (1,32 US cents/kwh), et aux Emirats Arabes Unis (1,35 US cents/kwh) traduisent la compétitivité croissante de l'énergie solaire.

Figure n°6: Production nette mondiale d'électricité par source en 10³ GWhe (Gigawatt heures)



Source : IEO2021 Release, CSIS 6 Octobre 2021

La Figure 6 indique une croissance linéaire de la consommation de l'énergie solaire de 2010 à 2020, et une tendance prévisionnelle de nature exponentielle de 2020 à 2050 ; cette dernière coïncide avec le seuil temporel de la neutralité carbone fixé par la majorité des 196 pays signataires de l'accord contraignant de Paris (COP 21). Ainsi, les combustibles fossiles ont tendance à perdre de plus en plus de leur importance par rapport au solaire, pas simplement pour des impératifs d'ordre environnemental mais pour des raisons purement économiques. Lorsqu'une nouvelle capacité de production d'électricité est envisagée, le recours aux énergies renouvelables est dorénavant l'option la plus avantageuse sur tous les plans. Les perspectives à l'horizon 2022 prévoient une nouvelle baisse des coûts mondiaux de l'énergie renouvelable. Cette tendance confirme que les énergies renouvelables à faible coût permettront des utilisations dans les transports, les bâtiments et l'industrie. BP souligne que parmi les faits marquants de 2020, figure la hausse des capacités électriques éoliennes et solaires : + 238 GW durant l'année, soit « 50% de plus que le plus fort développement annuel précédemment connu ». Malgré cette forte progression, les filières éolienne et solaire n'ont respectivement compté que pour 5,9% et 3,2% du mix électrique mondial en 2020, ce qui en fait les 3^e et 4^e sources d'électricité bas carbone après l'hydroélectricité (16%) et le nucléaire (10,1%). Cependant, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a exprimé clairement son optimisme à travers son World Energy Outlook 2020, où elle souligne que le solaire est le nouveau roi des marchés de l'électricité.

La hausse récente des prix des énergies fossiles depuis octobre 2021, conjuguées à la forte reprise de la demande après la pandémie du coronavirus, et d'autres facteurs, a entraîné une augmentation inattendue de 300% du prix du silicium métal selon Bloomberg. Ce qui a conduit à une hausse du coût du solaire photovoltaïque, après des baisses régulières depuis de longues années. Cette situation s'explique par l'insuffisance des capacités actuelles des énergies renouvelables à répondre à la demande mondiale en énergies. Si les pays non producteurs d'hydrocarbures se pressent pour sortir des combustibles fossiles c'est parce qu'ils comptent parvenir à une indépendance énergétique tout en assurant la satisfaction de leurs obligations de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce sont ces pays mêmes qui sont à la pointe des technologies relatives aux énergies renouvelables, comme l'Allemagne qui veut porter sa capacité photovoltaïque à 98 Gigawatts en 2030, et la Norvège qui tire déjà 98% de son électricité des énergies renouvelables (hydroélectriques) et qui compte imposer 100% de véhicules électriques pour les nouvelles immatriculations à partir de 2025 ; en 2020, ce taux était de 50%. Il en est de même pour le Japon et l'Union Européenne qui veulent interdire la vente de véhicules neufs à essence et diesel à partir de 2035. Également, le Royaume Uni, la Suède, l'Irlande, les Pays-Bas, Singapour, ont décidé d'interdire les moteurs à combustion après 2030. Cette tendance ne cesse de se généraliser de par le monde. C'est dire l'importance que prendra l'énergie électrique à l'avenir.

III- Rétrospective du solaire photovoltaïque en Allemagne

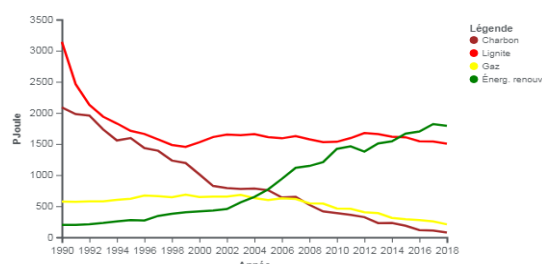
L'exemple de l'Allemagne est édifiant, en ce sens que c'est un pays qui ne dispose pas de conditions naturelles très favorables pour le développement des énergies renouvelables, et en particulier pour le solaire photovoltaïque. Pourtant, ce fut le premier pays au monde à décider en 1998 d'arrêter volontairement ses centrales nucléaires (au nombre de 17), sans impératif technique ou économique, pour se tourner vers les énergies renouvelables. En 2018, la part de l'électricité d'origine nucléaire en Allemagne n'était que de 11,8 % de sa production électrique, contre 71,7% en France. Par ailleurs, l'Allemagne, à travers sa loi EEG (Erneuerbare Energien Gesetz), a décidé également de mettre fin à l'utilisation du charbon

(houille et lignite) pour la production de l'électricité en 2038, bien que le pays dispose de 36 milliards de tonnes de réserves prouvées de charbon en 2019.

La politique de transition énergétique allemande, n'a pu être mise œuvre qu'après l'arrivée au pouvoir du gouvernement de coalition des sociaux-démocrates et des Verts en 1998. La réussite de la stratégie allemande des énergies renouvelables est le fruit d'une conjonction d'un choix politique courageux et d'une volonté populaire responsable et inébranlable ; ce front a réussi à briser la résistance du lobby du nucléaire, des énergies fossiles et des grands industriels. En effet, le soutien de la population allemande au développement des énergies renouvelables a été crucial dans cette bataille ; 83% d'allemands se sont prononcés en 2012 en faveur de ces énergies. D'ailleurs ce sont les particuliers, les coopératives de citoyens et les agriculteurs qui se sont lancés les premiers dans l'installation des éoliennes et des panneaux photovoltaïques, avant même les acteurs traditionnels des énergies. A la fin de l'année 2020, on dénombre plus de deux millions de systèmes photovoltaïques opérationnels en Allemagne, produisant 50 GWh/an pour environ 17 millions de ménages. La loi EEG, consacrée au développement des énergies renouvelables et adoptée en mars 2000, est la feuille de route qui a balisé la politique énergétique allemande (Energie wende). En vertu de cette loi, l'autorité fédérale s'engage à garantir pour les producteurs d'électricité renouvelable un tarif de rachat très avantageux sur une durée de 20 ans (450€/MWh, jusqu'en 2009), avec une obligation légale pour le gestionnaire du réseau électrique allemand de racheter en priorité la production. Cette mesure de soutien publique a été suffisante pour rassurer les investisseurs potentiels et à booster la recherche et le développement. Dans le domaine du photovoltaïque, cette loi avait encouragé depuis son début, l'autoconsommation de l'énergie produite. Des ajustements ont été opérés en 2004, 2008, 2012 et 2021, pour réduire les charges des consommateurs.

La singularité du système allemand, c'est que les énergies renouvelables n'ont pas été initiées par les compagnies énergétiques connues, mais par des agriculteurs, des coopératives, des régies municipales et d'autres investisseurs ; ces catégories détenaient en 2019 près de 40% des capacités installées. En 2012, les quatre plus importantes sociétés énergétiques allemandes (EON, RWE, Vattenfall et EnBW) ne possédaient que 5% des capacités installées des énergies renouvelables, contre 35% pour les particuliers, et 11% pour les agriculteurs. La diversité des intervenants dans le marché des renouvelables a été jugée plus efficace au marché de l'énergie que le schéma classique des grands groupes. Il y a lieu de noter, également, le foisonnement de centres d'expertise indépendants en Allemagne qui ont pris part à ce modèle énergétique, alors que partout ailleurs, cette mission est dévolue à des instances centralisées, sans le concours d'acteurs externes. Dans le cadre de la loi EEG, l'Allemagne s'est fixée un objectif de 18% d'énergies renouvelables dans sa consommation totale en 2020, et 60% en 2050. *« Des études convergent pour affirmer qu'un système électrique 100% renouvelable en Allemagne ne coûterait pas plus cher que celui d'aujourd'hui, et qu'il pourrait même être moins onéreux. Toutes les études prospectives indiquent clairement que l'éolien et le solaire seront à l'avenir les deux principales sources d'électricité de l'Allemagne. »* Fraunhofer ISE. (2012, Novembre).

Figure n°7 : Production d'énergie primaire par source en Allemagne



Comme le montre la Figure 7, la production d'énergie à partir du charbon a chuté fortement et régulièrement depuis 1990, le lignite s'est stabilisé à partir de 1998 après une chute depuis 1998. Le gaz naturel a connu une stabilité relative de 1990 jusqu'en 2008 ; depuis, il a baissé modérément. Par contre, les énergies renouvelables n'ont cessé de croître de manière continue depuis 1990 ; pourtant les conditions naturelles de l'Allemagne ne sont pas suffisamment favorables au développement des énergies renouvelables, en particulier pour le solaire photovoltaïque. En effet, la durée moyenne d'insolation en Allemagne n'est que de 1600 heures, soit 54% de la moyenne algérienne ; sa superficie de 357 386 km², avec une densité de 230 habitants/km², est couverte par des forêts, des chaînes de montagnes, des rivières, ce qui pénalise le développement du solaire photovoltaïque qui exige de vastes étendues dégagées et inhabitées. Or, malgré cette situation très peu favorable, l'Allemagne s'est tournée résolument vers les énergies renouvelables, d'où elle a tiré 51,8% de sa production électrique durant le premier semestre 2020 et 43,4% durant le premier semestre 2019, avec une prépondérance pour l'éolien (respectivement 23,3% et 29%) ; le solaire photovoltaïque ayant compté pour 8,2% et 10%. A l'échelle européenne, l'Allemagne a occupé le premier rang en 2019 pour la production d'électricité photovoltaïque avec 36,1 % du total européen, devant l'Italie et le Royaume-Uni. En termes de puissance installée, elle occupe également le 1^{er} rang européen et le 4^{ème} rang mondial en 2020, derrière la Chine, les États-Unis et le Japon. Un objectif de 100 GW de solaire a été fixé pour 2030 avec neutralité carbone en 2045 au lieu de 2050, et une réduction de 65% des émissions de gaz à effet de serre en 2030.

Tableau n°3 : Evolution de la production d'électricité photovoltaïque en GWh en Allemagne

Années	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production	11729	19599	26380	31010	36056	38726	38098	39401	45784	47517	50600

Source: Data and statistics. IEA

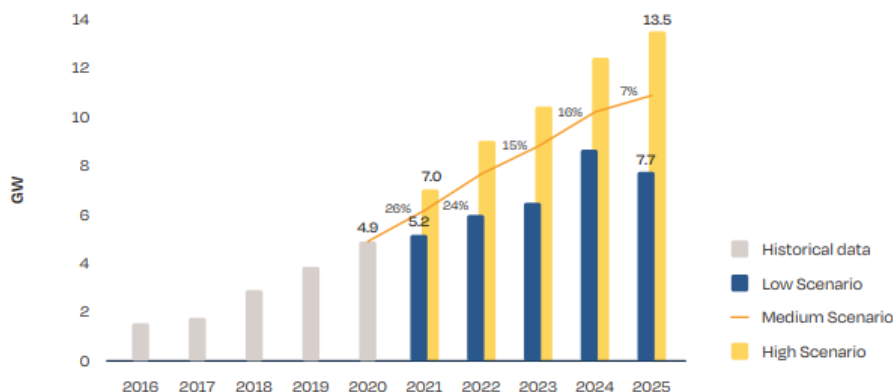
Le tableau 3 montre que la production d'électricité photovoltaïque a été multipliée par 11,5 fois depuis 2008 où elle a enregistré 4 420 GWhs ; en 2020 elle a atteint 50 600 GWhs.

« La politique de transition énergétique allemande, lancée par le gouvernement de coalition des sociaux-démocrates et des Verts en 1998, a créé plus de 200000 emplois entre 2004 et 2013. Et les citoyens sont au cœur du processus : les coopératives (plus de 900) et les agriculteurs constituent les premiers installateurs de parcs éoliens ou photovoltaïques, devant les grands énergéticiens. » (Vincent Boulanger, 2017).

Le revirement spectaculaire de l'Allemagne s'explique d'une part, par des préoccupations environnementales liées aux risques potentiels de l'industrie nucléaire (exemples : accidents nucléaires de Three Miles Island en 1979, Tchernobyl en 1986, Fukushima en 2011) et aux effets sur le réchauffement climatique de l'industrie du charbon, et d'autre part par la hantise de l'épuisement inéluctable du pétrole et du gaz dans une soixante d'années. En réalité, la population allemande s'est toujours opposée au nucléaire depuis la construction des premières centrales en 1969. L'accident nucléaire de Fukushima fut l'onde de choc qui a précipité la chute du nucléaire en Allemagne. En effet, le 15 mars 2011, soit quatre jours après cet incident, la chancelière Angela Merkel, décida la désactivation dans l'immédiat des 8 plus anciens réacteurs nucléaires, représentant 70 TWh de production annuelle (12 % de la production totale d'électricité), et la fermeture des 9 autres (80 TWh) au plus tard en 2022. Une décision très lourde de conséquences, pour les charges faramineuses du démantèlement de ces centrales et de l'épineux problème du stockage des déchets radioactifs, qu'elles représentent. (Bernd Lauter, 2021).

En termes de prévisions, SolarPower Europe a élaboré 3 scénarios sur l'évolution de la production allemande de l'électricité photovoltaïque pour la période 2021-2025 (SolarPower Europe, 2021).

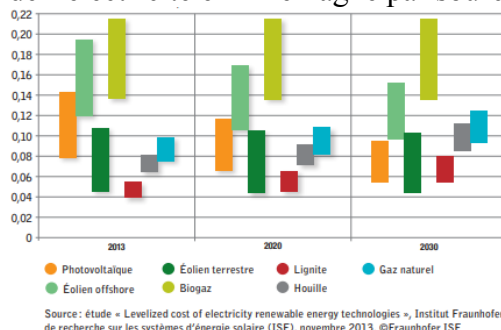
Figure n°8 : 3 scénarios (bas, médian, haut) du marché du solaire photovoltaïque en Allemagne 2021-2022



Source : SolarPower Europe 2021

Les prévisions des taux de croissance de la production du solaire photovoltaïque pour la période 2021-2021 affichent une tendance à la hausse selon le scénario médian, avec un fléchissement entre 2024 et 2025 où le taux de croissance ne serait que de 7%. Les faibles coûts marginaux de la production de l'électricité photovoltaïque (et éolienne) ont fait bénéficier l'Allemagne de l'un des plus bas prix de gros de l'électricité de l'Union européenne. Cependant, la hausse des diverses taxes, dont la taxe de soutien aux énergies renouvelables et les frais de réseau, supportées exclusivement par les ménages et les petites entreprises (les grandes entreprises sont exonérées) a fait grimper les prix à des niveaux records. Mais cette situation est largement acceptée par les citoyens allemands du fait de leur implication consentante dans la politique de transition énergétique. Pour assurer un suivi scientifique régulier, chaque année, le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie établit un rapport d'évaluation de l'état d'avancement de la politique de transition énergétique et émet des recommandations de réajustements pour demeurer toujours sur la trajectoire des objectifs fixés par la loi sur les énergies renouvelables (loi EEG) d'août 2014 : part des renouvelables entre 40 et 45% en 2025.

Figure n°9 : Prédiction des marges de coûts de production (LCOE) de l'électricité en Allemagne par source



En 2020, l'Allemagne disposait d'une capacité installée de 53,6 GWc de solaire photovoltaïque soit 7,6% des 707,5 GWc des capacités mondiales, dont 4 GWc ont été installées en 2019 et 5 GWc en 2020. Dans la même année les énergies renouvelables ont couvert 45% de la demande d'électricité en Allemagne, avec 9,2% de photovoltaïque.

(Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2021). En matière d'expertise scientifique, l'Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire ISE, est la référence en Allemagne, et le plus grand institut de recherche solaire en Europe. Il s'intéresse à cinq domaines d'activité : solaire photovoltaïque, bâtiments économes en énergie, technologies de l'hydrogène et stockage de l'énergie électrique, centrales solaires thermiques et procédés industriels, électronique de puissance, réseaux et systèmes intelligents. Il a été fondé en 1981 par le professeur Dr. Adolf Goetzberger et emploie plus de 1200 personnes.

Instruit par le génie allemand, M. Chitour, ancien Ministre et Professeur de thermodynamique, lors de sa participation à la conférence internationale sur la transition énergétique « Berlin Energy Transition Dialogue 21 » avait déclaré « *L'Algérie compte développer un partenariat d'exception avec l'Allemagne dans tous les domaines concernant l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et l'accompagnement dans la mise en place d'un plan hydrogène vert, qui se substituera à long terme au gaz naturel* ».

IV- Perspectives du développement du solaire photovoltaïque en Algérie

De toutes les énergies renouvelables que l'Algérie est en mesure de mobiliser rapidement, figure en premier lieu le solaire photovoltaïque. Une énergie largement disponible, propre, "gratuite", avec un potentiel techniquement réalisable de 1500 KWh/m²/an au Nord et 3500 KWh/m²/an au Sud. Le développement de ce vecteur énergétique en Algérie est en parfaite symbiose avec l'objectif général des pays signataires de la convention sur le changement climatique (GIEC) à savoir la sortie des combustibles fossiles. La création d'un ministère de la transition énergétique et des énergies renouvelables témoigne de la prise de conscience de l'importance stratégique de ce secteur : *le programme gouvernemental vise en particulier le développement des énergies renouvelables et l'hydrogène vert, tout en menant des actions publiques de sobriété et d'efficacité énergétique*. Le premier programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie a été initié en mars 2011 avec pour objectif l'installation d'une capacité de production de 22000 MW d'énergies renouvelables à l'horizon 2030, soit 1158 MW par an. Politiquement, ce programme a été érigé en 2016 au rang de priorité nationale. Malheureusement, en l'espace d'une décennie (2010-2019), seule une capacité installée de 390 MW a vu le jour à travers une vingtaine de centrales solaires ; ce qui représente 39 MW/an, loin derrière les 1158 MW/an envisagés dans le programme initial. En fait, contre toute attente, c'est la production de l'électricité des turbines à gaz qui a été plutôt privilégiée. Curieusement, cela a coïncidé avec la mise en service en 2013 de la société algéro-américaine d'assemblage de turbines à gaz General Electric Algeria Turbines (GEAT) à Batna ; une des 5 usines au monde et l'unique en Afrique à assurer une telle production.

Les énergies renouvelables fournissent actuellement moins de 400 MW (1% de la consommation électrique et 0,2% de la consommation énergétique globale). La production actuelle d'électricité provient à 98 % des centrales fonctionnant au gaz naturel ; une ressource naturelle cruciale pour l'économie algérienne en termes de recettes d'exportation. Les contrecoups de la volatilité des prix du gaz et du pétrole (par exemple, chute de 50% des entrées en devises de 2015 à 2020) menacent en permanence la stabilité des finances du pays ; d'où la nécessité urgente d'une diversification des exportations hors hydrocarbures. En fait, le syndrome hollandais (dutch disease) ne semble pas épargner l'Algérie. Par ailleurs, la chute de la production de gaz naturel depuis 2018 comme le montre le tableau 4, conjuguée à la forte croissance annuelle de la consommation nationale (5,6%), font peser un réel risque sur l'avenir de nos recettes en devises.

Tableau n°4 : Production et consommation de l'Algérie (en milliards de m³)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Production	77,4	79,6	78,4	79,3	80,2	81,4	91,4	93,0	93,8	87,0	81,5
Consommation	25,3	26,8	29,9	32,1	36,1	37,9	38,6	39,5	43,4	45,1	43,1

Source: bp: Statistical Review of World Energy 2021 | 70th edition

Sur un autre registre, la tendance mondiale à l'investissement accru dans les énergies renouvelables (même par les plus grands pays producteurs d'hydrocarbures), incite à plus de prudence à compter exclusivement sur les énergies fossiles dans l'avenir. En effet, les engagements pris lors de l'accord de Paris sur le climat (COP21) en 2015 et plus récemment à la COP26 (31 Octobre 2021) à Glasgow, ont balisé définitivement la trajectoire mondiale des énergies renouvelables ; 19 pays dont les Etats-Unis et le Canada se sont engagés à ne plus financer les projets des énergies fossiles à l'étranger. Mais, la réalité économique est telle que, les énergies fossiles ne peuvent être éliminées complètement de la sphère économique, qu'après leur épuisement total. C'est d'ailleurs cette crainte de pénurie, beaucoup plus que les considérations environnementales, qui ont finalement convaincu les grands acteurs énergétiques et les Etats, à s'impliquer dans la voie des énergies renouvelables.

Pour déployer le solaire photovoltaïque, l'Algérie détient deux atouts naturels exceptionnels : une longue durée d'ensoleillement (un des plus grands gisements solaires du monde) et de grands espaces faiblement habités. Selon le commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (CEREF) *"la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre 3900 heures notamment sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie solaire globale reçue par jour sur une surface horizontale d'un m² varie en Algérie entre 5,1 KWh (soit 1860 KWh/an/ m²) au Nord et 6,6 KWh (soit 2410 KWh/an/m²) dans le grand sud"*. Mieux encore, le solaire photovoltaïque dit flottant, peut être étendu aux 1400 km de notre façade maritime et sur 70% de la superficie des plans d'eau de nos 94 barrages. En effet, cette option est intéressante car elle offre à la majorité de la population algérienne, qui est concentrée au nord, la possibilité de bénéficier d'une électricité photovoltaïque de proximité, compétitive (pertes limitées de l'électricité lorsque la longueur des câbles est réduite). A titre expérimental, il a été décidé en mars 2021 d'étudier la faisabilité de la production d'électricité à partir du photovoltaïque flottant au niveau du barrage de Beni Haroun. Cette option, très répandue au Japon, présente de nombreux avantages :

- valorisation des espaces des plans d'eau des barrages pour fournir de l'énergie électrique durable, sans aucun impact négatif sur l'environnement ; mieux encore, les panneaux réduiraient la prolifération des algues.
- réduction considérable de l'évaporation de l'eau dans les barrages ; un phénomène qui s'accroît avec les hausses continues des températures, dues au changement climatique, surtout en Algérie. Ainsi, le barrage de Beni Haroun, d'une superficie de 1000 ha, perd annuellement plus de 50 millions de m³ par évaporation. Le volume évaporé de 35 millions de m³ récupérable, suffirait à satisfaire les besoins annuels en eau d'un million 900 mille personnes, à raison de 50 litres/personne/jour. De quoi alimenter les habitants des villes de Constantine et Mila, ou les unités du complexe sidérurgique de Bellara (Milia).
- l'effet refroidissant de l'eau permet de stabiliser le rendement des cellules ; on sait que l'augmentation de la température réduit notablement le rendement d'une cellule photovoltaïque, et la présence d'un plan d'eau en-dessous des cellules tempère l'effet des hausses de la température.

Le Japon a utilisé de manière intensive le flottant photovoltaïque qui occupe 80% du total des capacités installées de son parc solaire photovoltaïque. Cela se justifie par le fait que ce pays est un archipel volcanique fortement montagneux. Néanmoins, près de 70,8% de

l'électricité du Japon provient des combustibles fossiles en 2019. A la fin de 2020 ce pays détenait près de 9% de la capacité mondiale installée en panneaux photovoltaïques. (Solar Energy Research Institute of Singapore, 2019).

L'immense avantage du solaire photovoltaïque est qu'il permet à l'Algérie de préserver une part importante de son gaz naturel, une énergie fossile qui fournit 98% de sa production d'électricité produite par les centrales fonctionnant au gaz. Les quantités économisées seront orientées vers la pétrochimie, les carburants, et l'exportation. Selon M. Arkab, Ministre de l'énergie et des mines : *« la moyenne du prix de l'unité de gaz naturel sur le marché national s'élève à 0,28 dollars/unité, tandis-que celui-ci est cédé par l'Algérie à l'international à hauteur de 5 dollars. La subvention des factures d'électricité atteint 65% au profit des familles et des agriculteurs dans la limite de 12 000 KWh par an, et 25% au profit des activités économiques dans la limite de 200 000 KWh par an. Les subventions de l'électricité et du gaz en Algérie ont coûté au trésor public près de 18 milliards DA (130 766 436 \$US) en 2019 »*. (APS, 14 Mai 2020).

Pour encadrer le marché des énergies renouvelables, un arrêté (daté du 2 février 2014) du Ministère de l'Energie et des Mines a été publié dans le journal officiel N°23 (du 23 Avril 2014). Cet arrêté a institué les tarifs d'achat garantis et les conditions de leur application pour l'électricité produite par les installations des renouvelables. Ainsi, la durée des contrats d'achat est fixée à vingt (20) ans, à partir du jour du raccordement au réseau public. Pour les installations du solaire photovoltaïque dont la puissance est inférieure à 5 MWc et un potentiel de référence de 1500 heures de fonctionnement à pleine charge, le tarif est fixé à 15,94 DA/kWh pour les cinq premières années d'activité ; pour les quinze années restantes, ce tarif est modulé en fonction du potentiel réel du site, entre 20,08 DA/kWh et 11,80 DA/kWh (pour un potentiel supérieur à 1725 heures/an de fonctionnement). Pour les installations de puissance supérieure à 5 MWc, le tarif d'achat garanti pour les cinq premières années est de 12,75 DA/kWh ; pour le reste de la durée du contrat, le tarif est également modulé entre 16,06 DA/kWh et 9,44 DA/kWh (pour 1725 heures et plus, de fonctionnement). (Journal officiel N°23, 23 Avril 2014).

Selon le ministre de l'Energie, le tarif moyen de l'électricité appliqué aux citoyens était de 4,01 DA/kWh, un prix inférieur au coût réel de 5,4 DA/kWh. (APS, 19 février 2021). Il apparaît clairement que l'Etat va devoir subventionner davantage l'électricité photovoltaïque si le tarif actuel est maintenu à un niveau aussi bas. En fait, cette politique de subventions est pratiquée dans le monde entier. L'Algérie pourrait atténuer un petit peu le poids de ces subventions en exportant vers les marchés spot les quantités de gaz économisées lorsque les installations solaires photovoltaïques entre en production. Avec l'avènement de la voiture électrique, alimentée par le solaire photovoltaïque à travers les bornes électriques, l'Algérie pourrait économiser une bonne partie des 14,4 millions de tonnes (année 2019) de carburant (essences et gasoil) qui sont consommés annuellement par le marché national, avec une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre. A ce propos, l'Algérie demeure parmi les pays enregistrant les plus bas prix de vente de carburants à ses citoyens. En effet, le coût de production réel des carburants s'élève à 65,4 DA/L pour le sans plomb et 22,37 DA/L pour le gasoil. Donc, bien plus élevés que les prix affichés par les stations-service de Naftal. La différence étant supportée par l'Etat à travers les subventions. (APS, 19 Février 2021).

En termes de réalisations, citons la création en 2013 de la société de production d'électricité Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, SKTM.spa, dont une de ses missions principales est l'exploitation des énergies renouvelables. En 2014, cette société a réalisé 23 centrales solaires photovoltaïques dans les hauts plateaux et les régions du sud du pays, la mise en service de la centrale expérimentale de Ghardaïa, et de la ferme éolienne d'Adrar ; la capacité installée étant de 343 MWc. Le recours au solaire photovoltaïque participe à la réduction de la consommation des carburants (remplacement du Diesel) à travers le système

hybride solaire/conventionnel. Il est prévu l'hybridation de l'ensemble des sites classiques, jusqu'à saturation, à hauteur de 200 MWc d'ici 2022. Le surplus d'énergie électrique du solaire photovoltaïque pourrait être utilisé par des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène qui va être stocké en vue d'une utilisation ultérieure dans des piles à combustible qui produiront à leur tour de l'électricité en l'absence du soleil. (Présentation de SKTM). Citons également d'autres producteurs de panneaux photovoltaïques comme ENIE Photovoltaïque à Sidi Bel Abbès, Aurès Solaire à Batna avec 30 MW/an, Milltech à Boukherana (Chelghoum Laid) avec une capacité de production de 200 MW/an (600 000 panneaux), IRIS JC Industrial (Alger), MEKENERGIE (Laghout), CONDOR à Bordj-Bou-Argeridj. Ce dernier groupe a une capacité de production de 130 MW/an de panneaux photovoltaïques ; il est actionnaire majoritaire du consortium Power Generation qui s'est adjugé l'unique projet retenu de 50 MW de l'appel d'offre pour la réalisation d'un programme de 150 MW dans le sud-ouest du pays qui fut lancé en mai 2019 par la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG).

Un des projets phare, mis en œuvre récemment est le projet TAFOUK1 (2020-2024) ; il fut présenté en mai 2020, avec pour objectif la construction dans dix Wilaya, sur 6400 hectares, de centrales photovoltaïques d'une capacité totale de 4000 Mégawatts. Il est prévu la réalisation de 1000 MW de solaire photovoltaïque en 2021 et 15000 MW en 2035. *Le coût de cet investissement est estimé entre 3,2 et à 3,6 milliards de dollars. Ce projet pourrait créer 56 000 emplois en phase de réalisation et 2000 emplois lors de l'exploitation. Il permettra une économie de 400 millions de m³/an de gaz naturel, de créer 4,5 emplois par MW et d'éviter l'émission de 1,5 million de tonne de CO₂* (Ministère de la transition énergétique et des énergies renouvelables, Juillet 2021).

En Septembre 2021, le Ministère de la Transition Énergétique et des Energies Renouvelables, en collaboration avec le Ministère de l'Energie et des Mines avaient engagé les groupes publics Sonatrach et Sonelgaz dans la création d'une société par actions (50% pour chaque groupe) appelée SHAEMS pour la réalisation du programme national de développement des énergies renouvelables ; ses activités débiteront au dernier trimestre 2021. Le premier projet de cette société appelé « SOLAR1000 » a déjà bénéficié de 11 sites (El Bayadh, Ouargla, El Oued, Ghardaïa, El M'Ghair et Béchar) de 4250 ha pour la réalisation de 1000 MW d'électricité photovoltaïque, et le premier appel d'offres aux investisseurs a été lancé (APS, 21 Avril 2021).

La politique algérienne des énergies renouvelables, semble s'inspirer de l'exemple allemand, *en encourageant l'autoconsommation par des mesures incitatives, l'homologation des kits solaires individuels et la levée des contraintes réglementaires*. Pour réaliser des économies d'échelle, la majorité des pays misent sur les centrales solaires photovoltaïques de grandes dimensions, mais l'Allemagne n'a pas adopté systématiquement cette voie. En effet, la loi EEG allemande a fixé un programme de réalisation d'une puissance installée 2500 GWc par an pour le solaire photovoltaïque, avec une prédominance des petites installations résidentielles et tertiaires sur toiture (jusqu'à 40 kWc) avec 1,8 millions d'unités à la fin 2019. Et ce n'est qu'à partir des années 2010, que les grandes installations supérieures à 100 kWc ont pris de l'importance ; les installations dont la puissance est supérieure à 750 kWc ne représentent qu'un peu plus de 20% seulement des nouvelles installations contre 60% pour celles comprises entre 10 et 750 kWc (l'écho du solaire, 28 Avril 2020).

Dans la cadre de la coopération algéro-allemande, le ministère de l'intérieur, des collectivités locales et de l'aménagement du territoire et l'agence allemande de coopération (GIZ) ont signé le 07 novembre 2020 à Alger le contrat d'exécution du projet "communes vertes". Ce projet qui s'étale jusqu'en 2023, vise la réduction durable de la consommation d'énergie dans 04 communes-pilotes, l'amélioration de la gestion de l'énergie au niveau communal, la généralisation de l'opération à d'autres communes et la réalisation d'un cadre

incitatif pour la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique au niveau communal. Le représentant de GIZ a souligné que l'expérience de son pays a démontré que *"les communes sont un maillon essentiel pour contribuer énormément à la transition énergétique. Avec plus de 1500 communes, l'Algérie possède un répertoire très important de multiplicateurs pouvant donner l'exemple à un nombre important de citoyens"* (APS, 7 Décembre 2020).

Pour l'Algérie, la solution réaliste serait d'associer les centrales électriques à gaz existantes avec les nouvelles capacités à installer du solaire photovoltaïque en vue d'une exploitation combinée ; les activités humaines étant concentrées durant la journée, la plus grande part de la demande en électricité pourrait donc être assurée directement par le solaire photovoltaïque. En effet, la durée d'ensoleillement (durée pendant laquelle l'irradiation solaire est d'une intensité supérieure à 120 W/m^2) est de 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara algérien, ce qui correspond à une moyenne journalière de 10 heures. On peut donc supposer qu'au moins 50% de la demande nationale en électricité pourrait être fournie directement par le solaire photovoltaïque sans recours au stockage. Par conséquent, il est possible de réduire dans les mêmes proportions la consommation de nos centrales électriques fonctionnant au gaz naturel, et de manière concomitante réduire le niveau du dioxyde de carbone et surtout l'émanation fugitive du méthane dont l'impact sur le climat est plus pernicieux que le CO_2 . Notons que cette démarche est retenue par l'opérateur français EDF dans son projet de mise en œuvre du plus grand parc solaire du Chili dans le désert d'Atacama qui alimentera 1,2 million d'habitants en électricité photovoltaïque de 8h à 18h, et la nuit, par le recours à des centrales à gaz d'appoint.

Conclusion

L'analyse technico-économique présentée, révèle les avantages comparatifs du solaire photovoltaïque par rapport aux autres ressources renouvelables, en termes de disponibilité, d'accessibilité et de compétitivité. En particulier, l'Algérie bénéficie de conditions naturelles exceptionnelles pour développer massivement le solaire photovoltaïque (un des plus grands gisements solaires du monde) ; une ressource propre qui va renforcer les capacités énergétiques futures de notre pays, dans un environnement où la tendance mondiale est à l'abandon progressif des énergies fossiles. Lors de la COP26 (Novembre 2021), vingt pays dont les Etats-Unis, le Canada et le Royaume-Uni et cinq banques publiques dont l'agence française de développement ont pris l'engagement de mettre fin avant 2023 au financement extérieur de projets d'énergies fossiles avec un soutien aux énergies renouvelables. Les prévisions de dépenses annuelles d'investissements en matière d'hydrocarbures (pétrole et gaz) parlent de 350 milliards de dollars pour la période 2021 – 2030, et de 170 milliards de dollars au-delà. Ce qui laisse croire que le règne des énergies fossiles ne va pas s'éteindre brusquement mais de manière progressive.

Pour réaliser le programme national d'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, le gouvernement algérien semble opter pour la décentralisation des activités du secteur en engageant les collectivités locales dans la dynamique du développement de ces énergies. Ce qui va alléger le lourd fardeau des subventions allouées à ces institutions et réduire leurs dépenses, tout en créant des emplois au niveau local et renforcer les capacités du réseau national de l'électricité. Des instructions ont été données récemment aux communes du pays pour le recours massif au solaire photovoltaïque pour les besoins en électricité des écoles, des mosquées, des bâtiments administratifs, des habitations individuelles, etc...

Comme recommandations, nous considérons que l'intérêt de l'Algérie invite à ne pas délaisser les énergies fossiles car la demande ne pourra jamais s'éteindre, ne serait-ce que pour les multiples usages industriels des hydrocarbures, d'autant plus que l'Algérie n'est pas une source significative de rejets de gaz à effets de serre, au point d'inquiéter la communauté

internationale. Cette démarche permet à notre pays de profiter de ses ressources fossiles le plus longtemps possible. D'ailleurs, Sonatrach a passé de récents accords d'approvisionnement de l'Italie avec du gaz jusqu'en 2049. Un mémorandum d'accord a été signé avec la société italienne ENI pour le développement de la production d'hydrogène ; l'Algérie compte exporter l'hydrogène à travers ses gazoducs vers l'Italie en réduisant de 25% les quantités de gaz exportés pour approvisionner le marché intérieur. L'Algérie est le premier pays à entrevoir l'utilisation d'un gazoduc pour l'exportation de l'hydrogène. En parallèle, et pour perpétuer et renforcer ses capacités énergétiques, l'Algérie devra conserver ses turbines à gaz conventionnelles en les associant aux centrales solaires photovoltaïques pour assurer une production continue de l'électricité. Le surplus éventuel d'énergie pourra être utilisé dans la production d'hydrogène par le biais d'électrolyseurs. Les quantités de gaz économisées et l'hydrogène produit seront orientés vers l'exportation.

Bibliographie

1. Nations Unies (1992, 9 mai). *Recueil des Traités*, vol. 1771, p. 107. <http://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201771/v1771.pdf>
2. AXA. (2021, 29 septembre). *Future Risks Report 2021*. Disponible sur <https://www.axa.com/fr/magazine/future-risks-report-2021>
3. SEIA.(2021) *Solar industry growing at a record pace*. disponible sur <https://www.seia.org/solar-industry-research-data>
4. Photon.info (2021, 28 septembre). *Xlinks targets 10.5 GW wind and solar park in Morocco to deliver power to UK*. disponible sur <https://www.photon.info/en>.
5. Planetoscope-Statistiques (2012). *Energie fournie par le soleil*. Disponible sur <https://www.planetoscope.com/solaire/864-.html>.
6. Futura sciences (2001). *Le système solaire qu'est-ce que c'est ?* Disponible sur <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-soleil-3727/>
7. Planetoscope (2012). *Production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque*. Disponible sur <https://www.planetoscope.com/solaire/211-.html>
8. Planète énergies (2014, 27 août). *Le soleil, énergie de demain*. Disponible sur <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaïque-et-le-solaire-thermique>.
9. IFC. (2015). *Les centrales solaires photovoltaïques commerciales*. Disponible sur <file:///C:/Users/user/Desktop/Solar+Report+French WEB.pdf>
10. Energie. (2021). *Rendement et puissance crête des cellules photovoltaïques*. Disponible sur <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque/6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaïque/s/>
11. Photovoltaïque.info. (2020, 8 janvier). *Technologies des cellules photovoltaïques*. Disponible sur **Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.**
12. Wikipedia. (2021, 2 Octobre). *Crystalline silicon*. Disponible sur https://en.m.wikipedia.org/wiki/Crystalline_silicon
13. Mineralinfo. (2020, 10 juin). *Le silicium un élément chimique très abondant, un affinage stratégique*. Disponible sur <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique>
14. PR Newswire. (2021, 3 juin). *LONGi bat trois records mondiaux d'efficacité des cellules solaires TOPCon de type N, de type P et HJT*. Disponible sur <https://www.prnewswire.com/news-releases/longi-bat-trois-records-mondiaux-d-efficacite-des-cellules-solaires-topcon-de-type-n-topcon-de-type-p-et-hjt-822636921.html>.
15. Solar Energy Technology Office. (2021). *Multijunction III-V Photovoltaics Research*. Disponible sur <https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>
16. Révolution énergétique (2021, 1 septembre). *Saule technologies annonce la première installation commerciale de cellules photovoltaïques à pérovskite*. Disponible sur <https://www.revolution-energetique.com/saule-technologies-annonce-la-premiere-installation-commerciale-de-cellules-photovoltaïques-a-perovskite/>
17. Nathalie Mayer (11 Novembre 2021). Futura Planète. *Cette technologie rend les panneaux solaires 2 fois plus efficaces et beaucoup moins coûteux*. Disponible sur <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-cette-technologie-rend-panneaux-solaires-2-fois-plus-efficaces-beaucoup-moins-couteux-45767/>
18. The Associated Press. (2019, 27 Novembre). *China says it has met its carbon reduction goal early*. Disponible sur : <https://abcnews.go.com/Technology/wireStory/china-met-carbon-reduction-goal-early-67337405>

19. Renewable Energy World. (2020, 28 Avril). *BNEF says solar and wind are now cheapest sources of new energy generation for majority of planet*. Disponible sur <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/bnef-says-solar-and-wind-are-now-cheapest-sources-of-new-energy-generation-for-majority-of-planet/>
20. Renewable Energy World. (2020, 28 Avril). *BNEF says solar and wind are now cheapest sources of new energy generation for majority of planet*. Disponible sur <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/bnef-says-solar-and-wind-are-now-cheapest-sources-of-new-energy-generation-for-majority-of-planet/>
21. IRENA. (2021, Juin). *Renewable power generation costs in 2020*. Disponible sur <https://irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>.
22. Fraunhofer ISE. (2012, Novembre). *100% Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland*
23. Vincent Boulanger. (2017). *Transition énergétique : comment fait l'Allemagne*. Heinrich-Böll-Stiftung France. Disponible sur https://fr.boell.org/sites/default/files/transition_energetique_-_comment_fait_lallemagne_-_v_boulanger.pdf \\\
24. Bernd Lauter. (2021). *La sortie du nucléaire en Allemagne a-t-elle été compensée par une hausse de la production de charbon ?* Disponible sur <https://www.greenpeace.fr/la-sortie-du-nucleaire-en-allemande-a-t-elle-ete-compensee-par-une-hausse-de-la-production-de-charbon/> \\\
25. SolarPower Europe. *Global Market Outlook for solar power*. Disponible sur https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2021/07/SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-for-Solar-2021-2025_V1.pdf \\\
26. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (2021, 27 Juillet). *Photovoltaics Report*. www.ise.fraunhofer.de Disponible sur : <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
27. Solar Energy Research Institute of Singapore (2019). *Floating solar handbook for practitioners*. Disponible sur https://www.seris.nus.edu.sg/doc/publications/ESMAP_FloatingSolar_Gde_A4%20WEBL-REV2.pdf
28. APS (2020, 14 Mai). *Electricité-gaz : le subventionnement a coûté au Trésor public près de 18 mds DA en 2019*. Disponible sur <https://www.aps.dz/economie/105054-electricite-gaz-le-subventionnement-a-coute-au-tresor-public-pres-de-18-mds-da-en-2019>.
29. APS (2021, 19 Février). *Electricité : le tarif moyen appliqué au citoyen "inférieur au coût réel*. Disponible sur <https://www.aps.dz/economie/117852-electricite-le-tarif-moyen-applique-au-citoyen-inferieur-au-cout-reel>. \\\
30. Journal officiel N°23. (2014, 23 Avril). Disponible sur https://www.cder.dz/IMG/pdf/arrete_tarifs_achat_garantis_photovoltaique_eolien.pdf
31. APS (2021, 19 Février). *Electricité : le tarif moyen appliqué au citoyen "inférieur au coût réel*. Disponible sur <https://www.aps.dz/economie/117852-electricite-le-tarif-moyen-applique-au-citoyen-inferieur-au-cout-reel>. \\\
32. Présentation de SKTM. Disponible sur <https://www.sktm.dz/4/presentation-de-sktm>
33. Ministère de la transition énergétique et des énergies renouvelables. (Juillet 2021). *Actions engagées dans le cadre de la feuille de route de la transition énergétique*. Disponible sur <https://mteer.gov.dz/bilan07/mobile/index.html#p=1>.
34. APS (2021, 21 Avril). Disponible sur <https://www.aps.dz/economie/120858-la-societe-dediee-aux-enr-permettra-de-promouvoir-la-production-d-electricite-renouvelable>
35. L'écho du solaire. (2020, 28 Avril). *L'énergie solaire photovoltaïque en Allemagne : Etat des lieux en Avril 2020*.
36. APS (2020, 7 Décembre). *Algérie/Allemagne : lancement du projet de coopération "communes vertes"*. Disponible sur <https://www.aps.dz/economie/113854-algerie-allemande-lancement-du-projet-de-cooperation-communes-vertes>