

# Introduction

**Abdelilah SLAOU<sup>1</sup> et Jean-François GUILLEMOLES<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> ICube, CNRS, Université de Strasbourg, France*

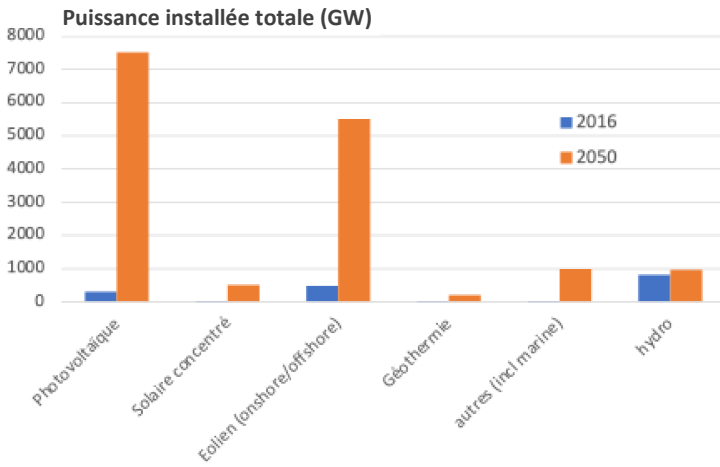
*<sup>2</sup> UMR 9006, CNRS, Institut Photovoltaïque d'Île-de-France, École Polytechnique,  
Chimie Paristech, Palaiseau, France*

La demande en énergie électrique bas carbone dans la prochaine décennie devrait connaître un accroissement considérable, compte tenu d'une part de la nécessité absolue de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> produites lors de la combustion du charbon ou du gaz pour l'industrie et l'habitat, et d'autre part en prévision de l'électrification des usages et en particulier l'utilisation massive à venir de véhicules électriques qui demanderont à être rechargés.

D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la part des énergies renouvelables dans la production de cette électricité devrait être très importante. En effet, comme le montre la figure I.1 qui illustre le scénario de l'AIE, la capacité de génération électrique installée devrait augmenter d'un facteur 5 entre 2016 et 2050.

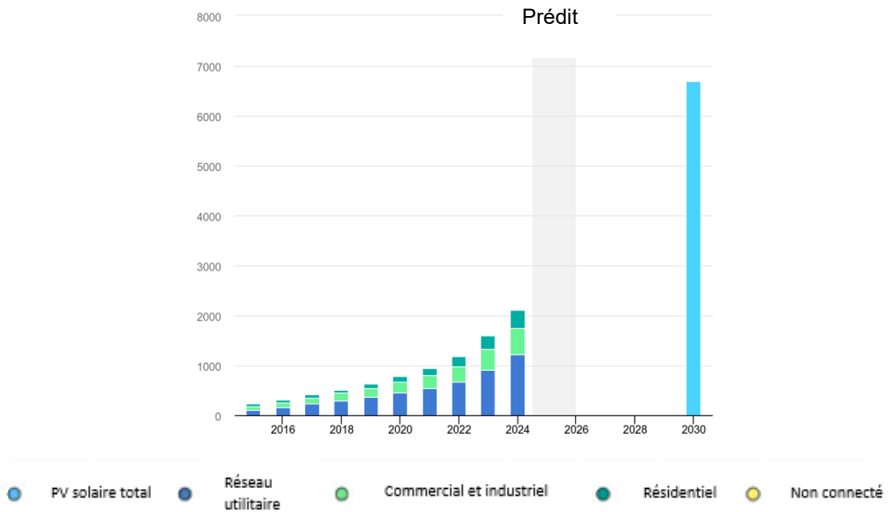
En particulier, l'énergie solaire photovoltaïque serait la grande gagnante puisque l'on passerait d'une capacité d'une centaine de GW en 2016 à presque 9 TW en 2050 (Haegel *et al.* 2023) ! De nombreux autres scénarios anticipent une forte croissance de la production d'électricité d'origine photovoltaïque.

Ces projections sont fondées sur les évolutions des dernières décennies.



**Figure I.1.** La capacité de génération électrique installée entre 2016 et 2050 selon nombre de scénarios. Adapté de « World Energy Outlook 2024 » de l'Agence internationale de l'énergie

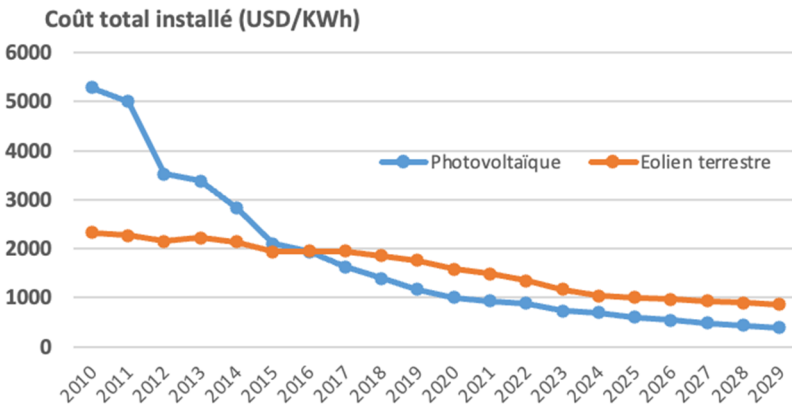
La première montre une progression continue de la pénétration de l'énergie photovoltaïque comme source d'énergie électrique, avec une accélération plus forte ces dernières années (figure I.2).



**Figure I.2.** Évolution de la puissance cumulée générée par des modules photovoltaïques installés dans le monde depuis 2015 (source : <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-power-capacity-in-the-net-zero-scenario-2015-2030>)

Un repère notable, la barre de 1 TW installé, a été franchi fin 2023. La capacité de production dans les usines du monde, en particulier en Chine et en Inde, et la forte demande permettront certainement d'atteindre les objectifs annoncés par l'AIE et d'autres agences.

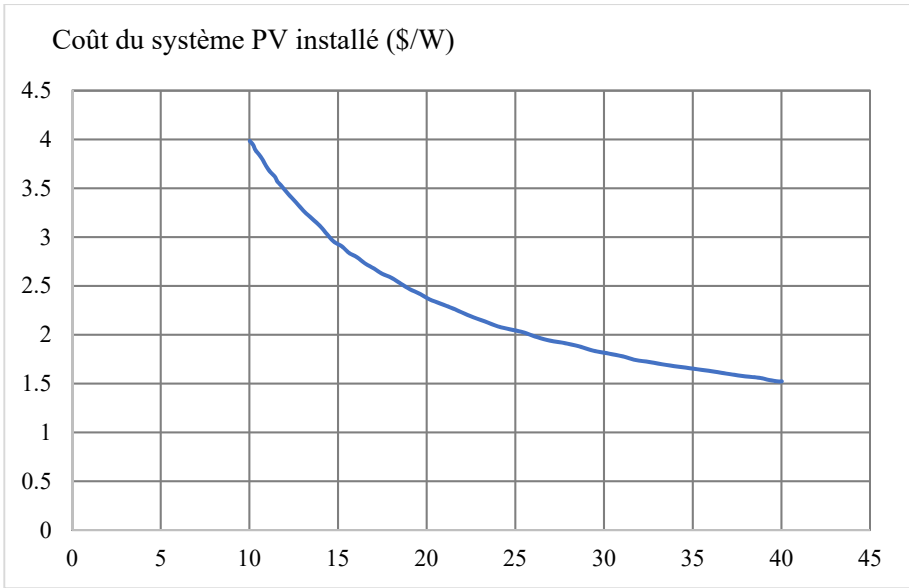
Une deuxième évolution très importante est la baisse continue du prix de l'électron photovoltaïque (figure I.3). Celle-ci rend financièrement rentables des centrales photovoltaïques installées dans certaines régions du monde comparées à d'autres sources de production d'électricité par des énergies fossiles ou même l'éolien terrestre (comme montré dans la figure I.3), mais aussi l'utilisation sur toitures, et dans de la production plus décentralisée. Cette baisse sensible du coût est due à deux facteurs concomitants : un effet de masse avec une très grande capacité de production de modules photovoltaïques, et une augmentation significative des rendements de conversion des cellules et modules et donc un rendement en €/Watt et/ou €/m<sup>2</sup> très compétitif.



**Figure I.3.** Évolution du coût total du solaire photovoltaïque et de l'éolien terrestre installé depuis 2010 et son évolution à venir. Adapté de « *Renewable Power Generation Costs in 2024* », International Renewable Energy Agency (IRENA)

Pour mieux illustrer la corrélation, la figure I.4 présente le coût total du système PV installé en fonction du rendement du module photovoltaïque. Le coût du système inclut évidemment celui des cellules, modules et convertisseurs. Il est clair qu'avec des modules plus efficaces, le coût par watt produit peut être réduit significativement pour un objectif donné de coût de l'électricité en kWh. On peut aisément constater qu'avec des modules PV d'un rendement de 20 % (technologies matures à base de silicium ou CIGS), le coût total est proche de 2,4 \$/m<sup>2</sup>. Avec des modules d'une efficacité de 35 % (technologies avancées de type tandem), on pourrait atteindre des coûts approchant les 1,5 \$/W. Les objectifs de recherche sont entrain de dépasser l'objectif de planification

montré ici, avec pour but d'atteindre environ 0,02 €/kWh en fonction de la technologie et le lieu d'installation.

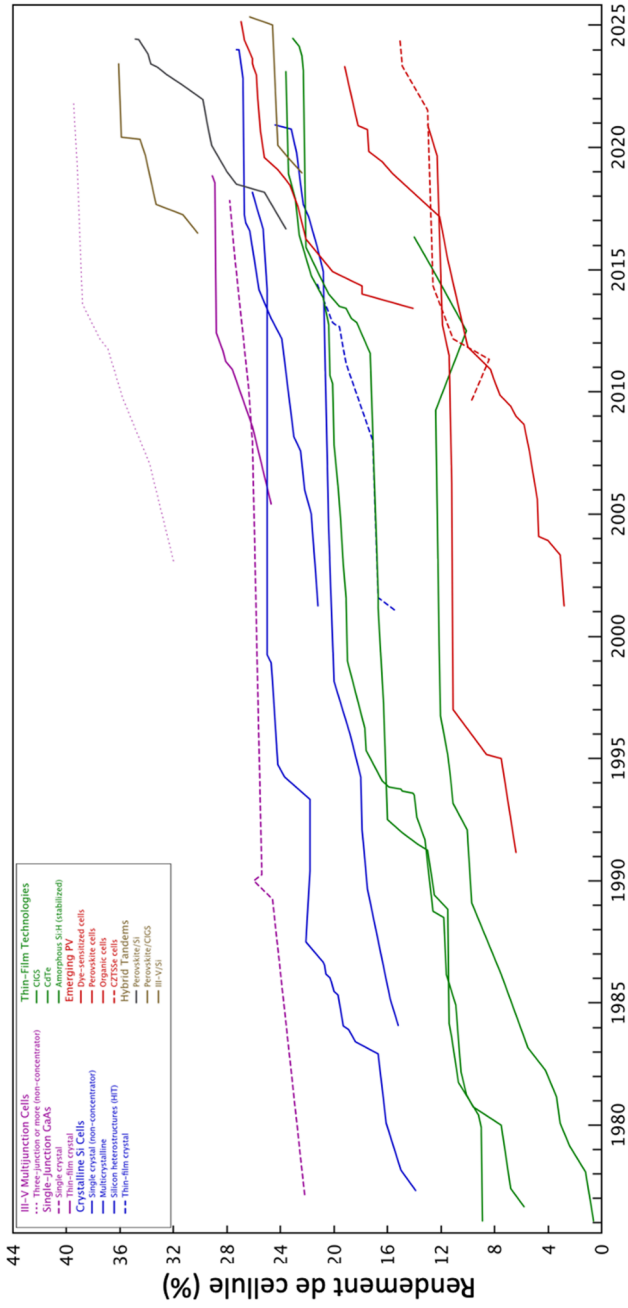


**Figure 1.4.** Coût du système PV installé en fonction du rendement de conversion du module. Cet exemple est dans le cas d'une puissance installée de 6,18 KW et une surface de toit de 37 m<sup>2</sup> (données extraites du Technical Report NREL/TP-6A20-77471, décembre 2020).

On peut affirmer que l'industrialisation massive de la filière photovoltaïque a certainement beaucoup contribué à la baisse des coûts, mais elle le doit également à un effort de recherche et développement acharné et durable à plusieurs niveaux :

- la croissance des semiconducteurs, la base de la cellule photovoltaïque ;
- le développement des architectures des cellules, puis des modules ;
- sans oublier tous les moyens de caractérisations et de diagnostics qui ont permis d'améliorer les procédés sur toute la chaîne de valeur.

Le premier chapitre de cet ouvrage, portant sur l'histoire du photovoltaïque, le montre particulièrement bien.



**Figure I.5.** Évolution du rendement de conversion (en laboratoire) des meilleures cellules photovoltaïques à base de différents matériaux

Une illustration synthétique de cet effort remarquable en R&D est montré sur la figure I.5 qui présente la progression des rendements records de conversion (en laboratoire) des meilleures cellules photovoltaïques pour la très grande majorité des technologies actuelles, et ce pour les technologies matures et industrialisées comme pour les technologies émergentes.

On estime en moyenne un accroissement des rendements de +0,7 % par an (+0,4 % pour les technologies matures et +1 % pour les technologies émergentes) ! La compétition pour atteindre les meilleurs rendements a été très stimulante entre les différents instituts de recherche au niveau mondial. La concurrence acharnée entre plusieurs industries du photovoltaïque, qui a vu l'entrée de nouveaux acteurs en particulier chinois, a aussi été essentielle pour permettre cette hausse des performances sur les rendements et la fiabilité à l'échelle industrielle. Les recherches pour améliorer l'efficacité des cellules solaires ne va pas s'arrêter, avec des objectifs visant à atteindre la limite actuellement acceptée de 29-30 % pour les homojonctions, et approchant les 45 % pour les multi-jonctions sans concentration de la lumière, avec des rendements de conversion intermédiaires pour les structures tandem, sans oublier la quête des rendements ultimes de conversion, en théorie proches de 90 %.

Les chapitres de cet ouvrage ont l'ambition de dresser l'état de l'art actuel des connaissances dans le domaine, et en particulier des différentes filières d'élaboration du dispositif photovoltaïque, en se concentrant sur les matériaux utilisés et les technologies associées. Pour chacune des filières, les différents chapitres détaillent les procédés de fabrication des composants photovoltaïques, fortement liés au matériau absorbant le rayonnement (semiconducteurs inorganiques, polymères, etc.) pour la conversion, et expliquent les verrous d'ordres technologiques et écologiques restant encore à lever. Ils présentent les rendements de conversion actuels et potentiels des composants photovoltaïques.

Les premiers chapitres de cet ouvrage sont dédiés aux technologies présentes sur le marché photovoltaïque à des degrés divers. Certaines de ces technologies sont assez matures, mais des incréments importants sont encore en cours et nécessaires pour leur déploiement à très grande échelle. Après cette introduction, la partie 1 commence par un chapitre qui retrace l'historique du cheminement conduisant au développement du photovoltaïque, de la découverte du principe photoélectrique jusqu'aux premières réalisations de dispositifs. Le chapitre 2 présente très largement les fondamentaux de la conversion photovoltaïque, des limites thermodynamiques au fonctionnement des cellules solaires.

Le chapitre 3 dédié au silicium solaire détaille plusieurs aspects de cette technologie mature, couvrant de la croissance des lingots de silicium aux modules sur plaquettes. Il présente l'état de l'art et les progrès à venir : au niveau matériau *via* la réduction du coût de la matière première (silicium charge et/ou épaisseur des plaquettes), au niveau

de la cellule grâce à la réduction des pertes optiques et électriques, l'amélioration des effets de passivation, la diminution du nombre d'étapes de leur fabrication (*via* l'automatisation par exemple) et au niveau module *via* l'architecture d'assemblage (verre/verre par exemple) et les pertes ohmiques de connexion. Grâce à la réduction rapide du coût du Watt-crête ces vingt dernières années, plus de 95 % des modules installés au sol et sur les toits utilisent des cellules solaires en silicium cristallin.

Le chapitre 4 de cet ouvrage, consacré aux filières industrielles des cellules/modules photovoltaïques en couche mince, traite essentiellement des matériaux semi-conducteurs inorganiques composées (cuivre-indium-gallium-sélénium ou CIGS, tellure de cadmium CdTe, III-V, etc.). Des progrès importants ont été observés ces dernières années, tant sur le plan du rendement de conversion que sur la fiabilité, accompagnés par le développement d'équipements appropriés à cette filière. Compte tenu du peu de matière utilisée et des technologies associées, le coût de la puissance générée est fortement orienté vers la baisse ( $< 0,4 \text{ €/W}$ ) par rapport à la filière dominante, mais une recherche innovante associée à un développement industriel est encore nécessaire pour que ces technologies débouchent commercialement. Parmi les perspectives les plus prometteuses actuellement se trouvent les dispositifs tandem de type couche mince sur silicium (voir chapitre 9 de l'ouvrage).

Le chapitre 5, adressant une des filières émergentes en couches minces, vise à présenter l'état de l'art et les perspectives sur les cellules/modules photovoltaïque organiques à base de polymères ou de petites molécules. En effet, en raison de leurs coûts faibles, de leur souplesse et de leur légèreté, les cellules organiques auront une place assumée dans le portfolio des modules photovoltaïques, en plus des progrès remarquables ces dernières années sur les rendements de conversion.

Les chapitres suivants sont dédiés aux technologies moins présentes sur les marchés et/ou en cours de maturation. Aussi, le chapitre 6 est consacré à la description des structures hybrides à colorants DSSC alors que le chapitre 7 traitera des cellules dites pérovskites qui constituent l'un des domaines phares de la recherche avec des progrès météoritiques, à un rythme inédit, et qui suscitent l'engouement de la communauté scientifique.

Le chapitre 8 sur les filières avancées des cellules photovoltaïques en couches minces a pour ambition de passer en revue plusieurs types de matériaux absorbants le plus souvent très en amont d'applications technologiques. On peut citer les clathrates de silicium, les nitrures  $\text{ZnSnN}_2$ , les oxydes absorbants, les cellules à base de colloïdes, sulfures, séléniures et iodures et d'autres. Les potentialités de ces absorbants pour les cellules solaires de demain seront discutées.

Le chapitre 9 s'intéresse aux structures photovoltaïques en tandem. En effet, c'est une manière élégante d'augmenter les rendements de conversion et de dépasser la limite

de Shockley-Queisser à simple jonction : l'empilement de matériaux de différentes largeurs de bande interdite permet l'absorption du plus grand nombre de photons du spectre solaire. Les composants photovoltaïques tandem peuvent être composés du même matériau mais ayant des structures cristallographiques différentes telles que le silicium amorphe/silicium cristallin (HIT pour *heterojunction*), ou alors constitués de deux matériaux différents tels que pérovskite/CIGS ou pérovskite/silicium. Les récents progrès et les potentialités de ces structures seront détaillés.

Le chapitre 10 ouvre des perspectives sur des concepts théoriques et des réalisations expérimentales qui envisageraient d'aller chercher les rendements ultimes. Il présente de manière simple les limites de rendement des dispositifs et les met en perspective avec différents concepts de conversions permettant d'approcher les limites théoriques de conversion.

## Bibliographie

Haegel, N.M. *et al.* (2023). Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. *Science*, 380(6640), 39–42.