



**La centrale solaire de Dabuzi, à Zhangjiakou, dans la province chinoise du Hebei, le 16 février.**

FUTURE PUBLISHING/FUTURE PUBLISHING  
VA GETTY IMAGES

DOSSIER

# Pleins feux sur l'énergie solaire

Avec ses coûts en chute libre, son installation facile et sa flexibilité, le solaire est le grand gagnant de la **transition énergétique**. Partout, notamment en Chine et aux Etats-Unis mais aussi en Allemagne ou aux Pays-Bas, les records de puissance installée sont dépassés. Partout, sauf en France...

Sur l'immense centrale solaire d'Al Dhafra, au sud d'Abou Dhabi, les ouvriers posent un panneau toutes les deux minutes en moyenne. Le site, dont le chantier a été lancé en 2020 par un consortium rassemblant le français EDF Renouvelables, le chinois Jinko Power et des opérateurs publics émiratis, est bientôt terminé. Avec quatre millions de panneaux solaires et une puissance installée de 2 gigawatts (GW), il figure parmi les plus massifs dans le monde. L'électricité qui y sera produite – l'équivalent de 160 000 foyers – est déjà achetée pour les trente prochaines années.

Partout dans le monde, au milieu de zones désertiques comme sur les toits de particuliers, sur les parkings, au-dessus des entrepôts et des usines, sur des lacs, au bord des autoroutes, sur des terrains agricoles comme dans des forêts défrichées, des panneaux solaires sont désormais installés à un rythme inédit. Car le photovoltaïque connaît une accélération spectaculaire de sa diffusion. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le solaire devrait représenter 2350 GW de puissance potentielle dans le monde d'ici à quatre ans, surpassant l'hydraulique en 2024, le gaz naturel en 2026 et le charbon en 2027 dans la production d'électricité.

En 2021, le Soleil – qui ne peut, par définition, produire qu'en plein jour – a représenté 1000 térawattheures (TWh) d'électricité à l'échelle mondiale sur 27 000 TWh consommés (nucléaire, hydroélectrique, éolien, etc.). La progression, sur 2022, devrait dépasser les 25 % pour le solaire, aiguillonnée par la lutte contre le réchauffement climatique et la hausse des prix de l'énergie. Une tendance qui devrait s'accroître encore par la suite. «Malgré les coûts d'investissement actuellement plus élevés en raison des matières premières, le photovoltaïque à grande échelle est l'option la moins coûteuse pour la nouvelle production d'électricité dans une grande majorité de pays du monde», constate l'AIE dans son rapport annuel sur les énergies renouvelables. «Le coût du solaire a chuté, analyse Bruno Bensasson, PDG d'EDF Renouvelables. Ce qui paraissait être un produit cher, pour des pays riches, est devenu compétitif pour toutes les économies du monde.»

**ACCÉLÉRATION DE LA TRANSITION**

La plupart des grands pays industrialisés ont battu leurs records en 2022 ou vont les battre en 2023. En nouvelles centrales installées. En énergie produite. En projets enregistrés pour les prochaines années. «La crise énergétique que nous vivons a permis d'accélérer une transition vers les renouvelables que nous avions du mal à faire au nom du seul climat», résume Richard Loyer, un des meilleurs connaisseurs français, président d'Enplan, une association de professionnels du secteur.

A commencer par la Chine, où 87,4 GW de panneaux ont été installés en 2022, selon l'administration nationale de l'énergie, dépassant très nettement le précédent record qui datait de 2021 (54,9 GW). Le chiffre aurait pu être bien plus élevé si les difficultés d'approvisionnement n'avaient pas ralenti la production. Les industriels chinois tablent, pour 2023 et les sept années qui suivent, sur 95 à 120 GW installés annuellement sur le territoire. Les entreprises chinoises investissent également à l'étranger, comme le montre un accord avec l'Ouzbékistan, annoncé mi-fé-

vrier, pour le développement en quelques mois de 2 gigawatts de panneaux. Une progression qui ne corrige toutefois qu'à la marge l'impact de l'énergie carbonée (gaz et charbon) dans ce pays dont les besoins énergétiques sont colossaux.

La tendance est aussi spectaculaire aux Etats-Unis, en particulier dans des Etats comme la Californie ou le Texas. La loi sur l'inflation (Inflation Reduction Act, IRA), défendue par le président Joe Biden pour accélérer la transition énergétique et favoriser la réindustrialisation du pays, va encore accen-

**LE GOUVERNEMENT ENTEND FAVORISER L'AUTO-CONSOMMATION PAR DES PARTICULIERS OU DES PME COMME EN ESPAGNE**

## Du Rajasthan au Kerala, l'Inde se rêve en puissance verte

**LES INDUSTRIELS INDIENS** misent gros sur le solaire. Les deux hommes les plus riches du pays, Mukesh Ambani et Gautam Adani, investissent massivement. La dernière grosse annonce remonte au 3 mars, quand Mukesh Ambani s'est engagé à développer des capacités de 10 gigawatts (GW) dans l'Etat de l'Andhra Pradesh (Sud). L'Inde se classe déjà en cinquième position mondiale, avec une capacité solaire installée de plus de 60 GW.

Une série de mégaprojets mais aussi de petites unités ont été déployés au cours des dernières années. L'immense parc solaire de Bhadla, dans le désert du Rajasthan, est considéré comme le plus important au monde avec plus de 10 millions de panneaux solaires qui s'étendent sur 5700 hectares et offrent une capacité totale de 2,25 GW. L'Inde a déjà donné son feu vert à la construction de plus de 50 fermes solaires à travers le pays.

Dans le Kerala, l'aéroport de Cochin peut aussi se targuer depuis 2015 d'être le premier opéré entièrement grâce à l'énergie solaire. Parallèlement, le gouvernement mise aussi sur des projets décentralisés en incitant les particuliers à exploiter les toitures pour les raccorder aux réseaux.

Le géant sud-asiatique s'est fixé des objectifs ambitieux en matière d'énergie renouvelable. Troisième émetteur de gaz à effet de serre mondial, en passe de devenir le pays le plus peuplé de la planète, il espère atteindre la neutralité carbone en 2070. Pour y parvenir, l'Inde veut installer une capacité de 500 GW de renouvelables d'ici à 2030. Aujourd'hui, 42 % des capacités installées sont des renouvelables, mais environ 70 % de l'électricité indienne continue d'être générée à partir de centrales à charbon.

«D'une capacité de 2 GW de renouvelables en 2014, nous sommes passés à

100 GW en moins de dix ans, c'est un progrès considérable», juge Swati Dsouza, spécialiste de l'énergie à l'Institut d'économie de l'énergie et d'analyse financière. Et quand bien même l'Inde n'atteindrait pas ses objectifs, «grâce à ces ambitions, un signal clair a été envoyé au monde des affaires et a permis d'impulser une trajectoire», estime l'analyste.

**Diminuer la dépendance à la Chine**

Le gouvernement compte sur le secteur privé et met en place des incitations financières. Plus d'une dizaine d'entreprises, dont le conglomérat de Mukesh Ambani, Reliance Industries et Tata Power, ont ainsi répondu, le 3 mars, à un appel d'offres pour bénéficier de 2,24 milliards d'euros de subventions du gouvernement afin de fabriquer des panneaux solaires et de diminuer ainsi la dépendance à la Chine. L'objectif est de parvenir à sa-

tuer l'effort. Pour 2023, l'Agence américaine d'information sur l'énergie fait état de projets représentant 29 GW, un quasi-triplement par rapport à 2020. Une étude de l'université de Princeton évoque une croissance continue jusqu'à atteindre 75 et 105 GW de panneaux installés en 2026 et 2027 grâce aux financements de la loi IRA. Avec des milliers d'emplois à la clé.

**LOBBY NUCLÉAIRE**

Idem au Brésil et en Inde. Mais aussi à l'échelle de l'Europe (41 GW supplémentaires installés). L'Allemagne (+ 7,9 GW), l'Espagne (+ 7,5), la Pologne (+ 4,9) et les Pays-Bas (+ 4) ont connu des progressions particulièrement élevées. Dans ce dernier pays, le solaire a représenté 14 % de la consommation électrique sur l'année, un record en Europe, alors même que les conditions d'ensoleillement sont moins favorables que dans les pays du Sud. «Les Pays-Bas ont montré comment des politiques simples et efficaces peuvent favoriser la croissance du solaire», analyse le cercle de réflexion Ember Climate, en relevant le développement des installations sur les toits.

La France apparaît à contre-courant. En 2022, 2,6 GW de panneaux solaires ont été installés, un chiffre inférieur à celui de 2021 (2,8 GW). «Dans le contexte inflationniste, où beaucoup de projets semblaient être bloqués, c'est finalement plutôt une bonne année, même si cela n'est pas complètement satisfaisant», tente de relativiser l'entourage de la ministre de la transition énergétique, Agnès Pannier-Runacher. Le retard français s'explique par plusieurs raisons. D'abord, par la place du nucléaire, une énergie décarbonée qui a donné des arguments aux énergéticiens pour ne pas avancer aussi rapidement qu'ailleurs. Ensuite, parce que la France a connu des mésaventures, dans les années 2000, avec le développement, subventionné, des panneaux photovoltaïques pour un coût considérable. Cela avait touché le ministère des finances et donné des arguments supplémentaires au lobby nucléaire pour ne pas faire du solaire un axe prioritaire. Conséquence: les panneaux ont certes produit 4,2 % de la consommation électrique nationale en 2022, soit 4 TWh de plus qu'en 2021. Mais, dans le même temps, pour faire face au trou d'air du nucléaire, la production de gaz a augmenté de 11 TWh, et les importations de 30 TWh, selon RTE, le gestionnaire des lignes haute tension en France.

La loi d'accélération sur les énergies renouvelables, adoptée en janvier, marque une étape importante mais insuffisante, selon les acteurs de la filière. Pour respecter les engagements de la France, il faudrait parvenir à installer 4,4 GW de solaire en 2023. «Pour tenir le rythme de la PPE [programmation pluriannuelle de l'énergie] et ceux donnés par le président de la République dans son discours de Belfort sur l'énergie [en février 2022], il faut ensuite viser plus de 3 GW par an d'ici à 2028, c'est un défi mais on peut y arriver», plaide l'entourage d'Agnès Pannier-Runacher. Selon RTE, 16 GW de projets solaires étaient en attente de développement, début 2023, un chiffre jamais atteint. Conséquence: dans ses pré-

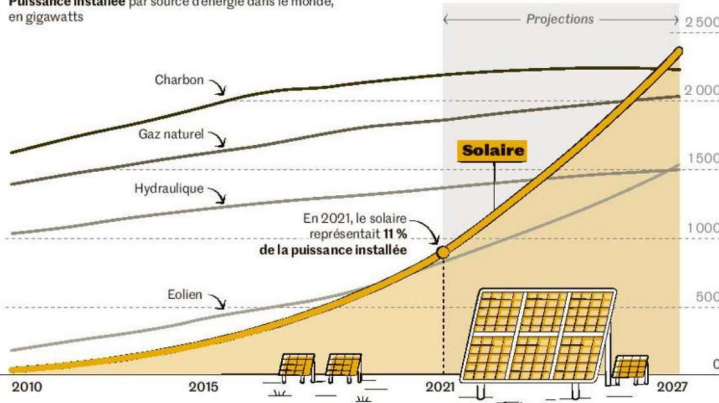
tisfaire les besoins nationaux et de pouvoir en exporter.

Gautam Adani, important acteur du photovoltaïque en Inde, n'a néanmoins pas répondu à cet appel d'offres. Le magnat cherche à préserver des liquidités après la débâcle boursière provoquée par les accusations de fraudes du cabinet de recherche en investissement américain Hindenburg Research. Le conglomérat avait déclaré en 2020 qu'il investirait plus de 18 milliards d'euros dans les énergies renouvelables d'ici à 2030 avec pour objectif d'atteindre une capacité de 45 GW. Les déboires du groupe pourraient donc compromettre les ambitions de l'Inde. D'autant que le pays «doit passer à la vitesse supérieure, notamment du fait de l'explosion de la demande en énergie au cours des dernières années», avertit Swati Dsouza. ■

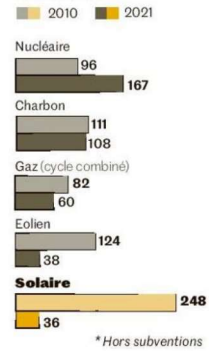
**CAROLE DIETTERICH (NEW DELHI, CORRESPONDANCE)**

## Le boom mondial du solaire, cette technologie à bas coûts...

Puissance installée par source d'énergie dans le monde, en gigawatts



Coût\* moyen de production d'électricité par technologie, en dollars par mégawatt-heure, dans le monde



visions, RTE va étudier un scénario dans lequel la croissance du solaire dépasserait même 7 GW par an. De son côté, le gouvernement entend favoriser l'autoconsommation par des particuliers ou des PME comme l'ont fait massivement les Espagnols. « Plutôt que d'avoir un bouclier tarifaire, face à la crise de l'énergie, ils ont développé l'autoconsommation avec du solaire sur les toits des particuliers », souligne ainsi Richard Loyer.

L'autre enjeu est celui de la fabrication des panneaux. Comme le solaire est en passe de devenir une énergie stratégique, la capacité à produire ses composants est désormais une question de souveraineté. Or, selon l'Agence internationale de l'énergie, plus de 80 % des différents composants arrivent de Chine, qu'il s'agisse du silicium, des cellules, des modules, etc. « La Chine a joué un rôle déterminant dans la réduction mondiale des coûts du photovoltaïque, ce qui a été bénéfique pour la transition énergétique. Mais, dans le même temps, le niveau de concentration géographique des chaînes d'approvisionnement mondiales est un défi pour les gouvernements », prévient l'AIE. La bataille est mondiale. Joe Biden, avec l'IRA, cherche à attirer les investisseurs et à relocaliser une partie de la production industrielle. L'Inde affiche l'ambition de construire des usines géantes. En Europe, la Commission européenne a lancé une alliance de l'industrie solaire pour accroître la production de panneaux de 4 à 30 GW d'ici à 2025.

La marche à franchir pour le continent européen est particulièrement haute. Un des principaux industriels chinois, Longi Green Energy Technology, a ainsi annoncé, début février, qu'il envisageait un investissement de 6,7 milliards de dollars pour doubler ses capacités de fabrication. Dans des délais extrêmement courts, la nouvelle usine pourrait produire 50 GW de cellules solaires supplémentaires par an. En comparaison, les Européens se sont félicités de l'annonce par Enel, l'énergéticien italien, en pointe sur le sujet des renouvelables, d'un investissement de 600 millions d'euros pour multiplier par quinze la production d'une usine en Sicile. Celle-ci deviendrait, en 2025, la plus importante sur le sol européen avec... 3 GW attendus.

### L'ENJEU DU RACCORDEMENT

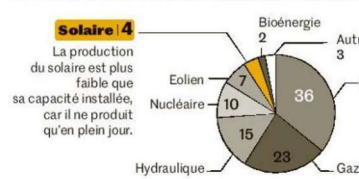
EDF Renouvelables, qui détient dans son portefeuille Photowatt, une entreprise pionnière dans la production des panneaux, cherche à céder. La société perd 30 millions d'euros par an, avait indiqué Bruno Bensasson, le PDG d'EDF Renouvelables, lors de son audition devant la commission d'enquête parlementaire sur la souveraineté énergétique de la France. Des projets sont en cours de développement, comme celui porté par Carbon, une entreprise qui a annoncé le 3 mars vouloir implanter une usine de plusieurs gigawatts de cellules et de modules d'ici à 2025 sur le site industriel de Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône). « Les Allemands, les Chinois ont ouvert le bal. On part de loin sur le plan industriel. Mais le solaire est en plein boom dans le monde et on souhaite se positionner sur le marché international », explique Pierre-Emmanuel Martin, un des fondateurs de l'entreprise.

L'enjeu dépasse largement la crise énergétique et les conséquences de la guerre en Ukraine. Toutes les projections font état d'une hausse massive de la consommation d'électricité dans le monde en raison du développement des véhicules à batteries et de la décarbonation progressive de l'industrie. « Le mouvement en cours pourrait accroître la demande plus rapidement cette décennie que ce qui avait été envisagé par la plupart des experts », souligne le cercle de réflexion Ember dans son dernier bilan. L'essentiel de cette hausse devrait être absorbé par les énergies renouvelables, en particulier le solaire, plus simple à installer.

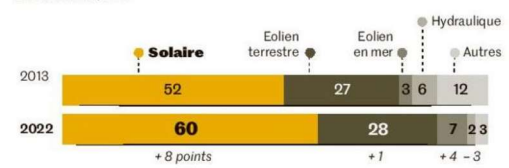
A condition de réussir à raccorder les millions de nouveaux panneaux aux réseaux de transport électrique. Bill Gates, dont le premier job étudiant fut de coder pour un de ces réseaux aux Etats-Unis, en fait un enjeu essentiel pour la transition énergétique. « A l'heure actuelle, plus de 1000 GW de projets potentiels d'énergie propre sont en attente d'approbation, et la principale raison du goulet d'étranglement est le manque de réseaux de transmission », alerte-t-il fin janvier dans son bloc-notes public. ■

LUC BRONNER

Production mondiale d'électricité par source, en 2021, en %

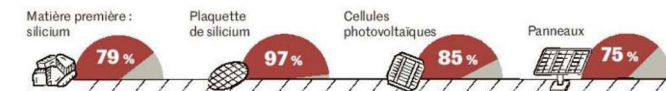


Investissements annuels par énergie renouvelable dans le monde, en %



## ... profite à la Chine, qui tient l'ensemble de la chaîne de production

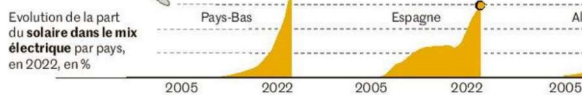
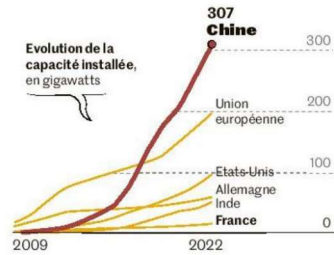
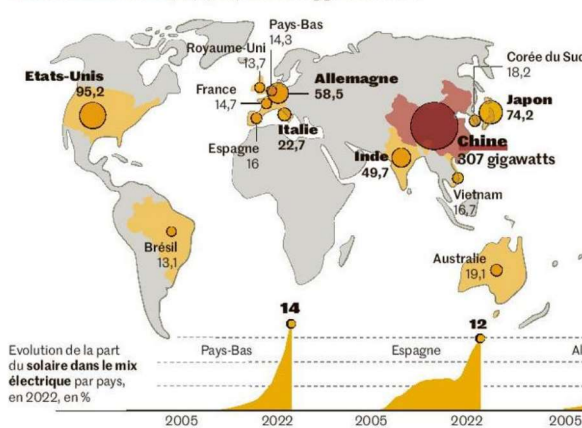
Part de la Chine dans la chaîne de production mondiale de panneaux solaires, en 2021



Sources : « World Energy Outlook 2022 », AIE ; Our World in Data ; Ember ; « Levelized Cost of Energy Comparison », Lazard ; Global Landscape of Renewable Energy Finance 2023, Irena

Infographie : Le Monde, Audrey Lagadeç, Benjamin Martinez

Puissance solaire installée par pays supérieure à 10 gigawatts, en 2021



## « La recherche actuelle permettrait d'aller vers les 30 % de rendement »

**CHERCHEUR ÉMÉRITE AU CNRS**, professeur invité au Collège de France en 2021-2022, Daniel Lincot a travaillé sur l'énergie solaire pendant plus de quarante ans.

**Comment expliquer l'accélération du solaire depuis deux ans ?**

Ce qui est spectaculaire dans le domaine du photovoltaïque, c'est que les premiers cellules efficaces ont été découvertes en 1954 grâce au silicium et qu'en 1958 elles équipaient déjà les premiers satellites. A cette époque, il n'y avait pas de réelle barrière sur les prix, le spatial a fonctionné pour le solaire un peu comme la formule 1 pour l'automobile. En 1958, pour le premier satellite, la puissance est de l'ordre de quelques watts. Ensuite, et depuis cette date, la croissance a été exponentielle avec une progression de la puissance installée mondiale de 30 % par an, tout en restant invisible vis-à-vis des autres énergies, dans l'épaisseur du trait comme on dit, jusqu'à ce qu'elle apparaisse soudainement dans le paysage. Longtemps, le solaire a été considéré comme une lubie.

**Pourquoi la France, qui a été pionnière, a-t-elle aujourd'hui un tel retard ?**

La France est longtemps restée dans le peloton de tête avec les Etats-Unis et le Japon, loin devant l'Allemagne. Des entreprises, dans les années 1960 ou 1970, ont été pionnières – je pense à RTC, l'ancêtre de Photowatt, aujourd'hui en difficulté. Dans les années 1970, face au choc pétrolier, le nucléaire est apparu comme la meilleure solution, et le solaire renvoyé à une forme d'utopie ou de lubie. Il y a certes eu un commissariat à l'énergie solaire, comme il y a eu un commissariat à l'énergie atomique, mais il a malheureusement fait long feu. Les années 1980, sous Mitterrand, marquent le début d'une longue traversée du désert, jusqu'au milieu des années 2000. C'est une période où en Allemagne, au contraire, les crédits augmentent et l'énergie des chercheurs est utilisée pour faire augmenter les rendements et baisser les coûts. Le photovoltaïque industriel décolle à ce moment-là. Il va se passer la même chose que pour les écrans plats, les téléphones mobi-

les ou les véhicules électriques. Au début, c'est tellement cher que le développement semble impossible. Puis les prix baissent en même temps que les procédés sont industrialisés. Grâce à cela, l'énergie solaire est devenue très compétitive économiquement.

**La course au rendement des cellules solaires est essentielle. Dans quelles directions s'oriente la recherche aujourd'hui ?**

La puissance produite par le Soleil, en pleine lumière, est de 1000 watts par mètre carré lorsqu'elle arrive sur la surface de la Terre. Pensez à ce que donne l'éclairage d'un projecteur de 1000 watts pour mesurer ce que cela représente. Il faut évidemment tenir compte de l'alternance jour-nuit, des saisons et de la localisation. On peut ainsi estimer qu'en France par exemple, cela représente une énergie annuelle de 1,3 MWh sur un mètre carré. Si 20 % de cette énergie peut être convertie en électricité par des panneaux photovoltaïques, cela signifie une production de 260 kWh par mètre carré. Avec environ

15000 kilomètres carrés, soit un petit tiers des espaces déjà artificialisés, vous couvrez théoriquement l'intégralité des besoins énergétiques primaires de la France, c'est-à-dire l'électricité, mais aussi le pétrole et le gaz. Vous avez là une indication du potentiel de l'énergie solaire.

Le photovoltaïque est un cas d'école de l'innovation technologique : une succession de sauts et de paliers. Dans les années 1950, le rendement des cellules silicium est à 6 %. Il atteint rapidement près de 15 % puis plafonne pendant dix ans. A la fin des années 1980, on franchit la barre des 20 %. La question des rendements du photovoltaïque est donc essentielle et a concentré une grande partie des recherches depuis des décennies. Le progrès est considérable : aujourd'hui, le nouveau record a été établi à 26,7 % par un laboratoire au Japon. Le foisonnement de recherches actuelles, en particulier autour des cellules tandem et de la perovskite, montre qu'on pourra à nouveau dépasser ce seuil et aller vers 30 %, voire plus. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR L. BR.