



Dans un champ de panneaux photovoltaïques à Al-Dhafra (Emirats arabes unis), le 13 novembre 2023. KARIM SAHIB/AFP

# La ruée vers le solaire

DOSSIER

Certains signes ne trompent pas. Surtout s'ils viennent du camp adverse. En août, l'Australie, pays charbonnier, a annoncé le lancement de ce qui doit devenir la plus grande ferme solaire du monde, SunCable. L'Arabie saoudite, temple de l'or noir, fait désormais surgir du désert des projets solaires géants comme celui de Sudair. Au Texas (Etats-Unis), bastion pétrolier et gazier, la multinationale TotalEnergies s'appête à mettre en service à Danish Fields et Cottonwood deux de ses plus grandes centrales solaires.

Que ces régions du monde connues pour leur dépendance aux énergies fossiles se lancent à grande échelle dans cette industrie bas carbone en dit long. Cette ruée ne signifie en rien l'abandon des énergies fossiles, mais plutôt qu'il ne faut pas passer à côté de l'histoire. Ces dix dernières années, l'industrie photovoltaïque a connu une ascension que même les écologistes les plus fervents n'avaient pas imaginée. «Aucune autre source d'électricité n'est passée de 100 TWh [térawattheures] à 1000 TWh plus rapidement», soulignent les analystes d'Ember, un cabinet de conseil britannique sur l'énergie. Pour atteindre cet objectif, «le solaire et l'éolien n'ont pris que huit et douze ans respectivement, loin devant le gaz (vingt-huit ans), le charbon (trente-deux ans) et l'hydroélectricité (trente-neuf ans)».

Cette année encore, le monde est en passe d'installer 29 % de capacités (593 gigawatts (GW)) en plus qu'en 2023, après une hausse de 87 % en 2022. Ce qui correspond au développement, tous les deux jours, de ce qui était produit sur une seule année vingt ans plus tôt. «Au total, 593 GW installés en 2024 produisent autant d'énergie qu'environ 40 réacteurs nucléaires comme ceux de Flamanville», estime Alain Grandjean, cofondateur et associé du cabinet d'expertise Carbone 4.

Une vitesse de propagation qui laisse à penser que, d'ici à 2040, comme le prévoit le scénario de neutralité carbone de l'Agence internationale de l'énergie, le solaire pourrait s'imposer comme la première source d'énergie primaire au monde et pas seulement d'électricité. Et pourquoi pas damer le pion à l'or noir. «Aujourd'hui, le pétrole représente 31 % de l'énergie primaire consommée dans le monde. D'ici à 2050, le solaire occupera sans doute une place comparable», estime Philippe Gauthier, analyste des tendances futures chez Coboom à Montréal.

L'expert insiste sur le fait que ces deux industries sont structurées différemment : «Contrairement au pétrole qu'il faut laborieusement aller chercher dans le sol, le solaire, lui, peut être fabriqué en usine. Il est fa-

Universelle, versatile et très peu chère, l'énergie photovoltaïque est promise à **remplacer le pétrole** comme principale source d'énergie primaire. Mais les défis restent immenses : réseau, stockage, acceptabilité environnementale et sociale...

cile à automatiser et à miniaturiser. Comme cela a été le cas dans l'informatique où s'est exercée la loi de Moore qui a prédit une plus grande rapidité, une plus petite taille et un moindre coût des ordinateurs.»

En théorie, le solaire a toutes les vertus pour régner sur les autres énergies. «C'est la source d'énergie primaire la plus abondante sur la planète : la Terre reçoit tous les ans plus de solaire que la totalité des réserves d'uranium, de gaz et de pétrole réunis», rappelle Xavier Daval, président de la commission solaire du Syndicat des énergies renouvelables.

## FREINS SOCIÉTAUX ET TECHNOLOGIQUES

Adaptables, les panneaux peuvent aussi bien être installés dans des propriétés privées que sur des sites industriels, sur les toits des supermarchés que sur ceux des écoles, sur les façades, les routes, dans certains champs dans le cadre de l'agrivolt-

taïsme. Ils conquièrent aussi les endroits les plus reculés. Pouvant se dispenser des grands réseaux électriques dans les pays qui n'en ont pas. Ou dans les zones de guerre, comme en Ukraine, où ceux-ci ont été délibérément ciblés et endommagés. «C'est une technologie robuste, simple d'usage et qui peut être mise en œuvre facilement, tout le monde peut se l'approprier», poursuit ce même interlocuteur.

Et surtout le solaire a gagné la bataille de la compétitivité. Au cours de la dernière décennie, il est devenu l'énergie la moins chère, le prix du watt de panneau solaire étant passé de 3 euros à 15 centimes environ. «En quinze ans, on a multiplié par quatre l'efficacité énergétique des panneaux», souligne Xavier Daval. Sur cette période, la production d'un panneau est passée de 150 watts à plus de 700. «Cela ne s'est vu nulle part ailleurs, y compris dans l'automobile, où, en l'espace d'un siècle, il

**LE SOLAIRE A GAGNÉ LA BATAILLE DE LA COMPÉTITIVITÉ. AU COURS DE LA DERNIÈRE DÉCENNIE, IL EST DEVENU L'ÉNERGIE LA MOINS CHÈRE**

## « Une énergie non fossile à l'heure de la crise climatique »

ANAËL MARREC, historienne des techniques au Centre François-Viète (Nantes Université), est spécialiste des alternatives et des conflits énergétiques contemporains.

### A quand remontent les débuts de l'énergie solaire ?

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. L'énergie solaire trouve ses premières applications comme moteur dans un contexte d'industrialisation et d'expansion coloniale. Tout au long du XIX<sup>e</sup> siècle, les puissances industrielles ont conscience que le charbon va s'épuiser. Dans certaines colonies où le charbon est absent et le soleil abondant, des ingénieurs vont alors tester des machines solaires. En Algérie, Augustin Mouchot expérimente des moteurs de 1877 à 1880 grâce au soutien du gouvernement français. En 1890, Charles Tellier, prône une «conquête pacifique de l'Afrique occi-

dentale par le soleil». De telles expérimentations sont aussi menées dans l'Empire britannique – en Inde dans les années 1880, en Egypte au début du XX<sup>e</sup> siècle.

### Les révolutions énergétiques sont indissociables de transformations sociétales profondes. Comment cela a-t-il commencé ?

Le charbon, justement, a opéré une rupture cruciale. Cette substance n'est rien d'autre que de l'énergie solaire stockée dans les sous-sols, grâce à des millénaires de fossilisation des matières végétales. Au Royaume-Uni, à l'époque victorienne, elle a été libérée en un temps restreint pour actionner les machines, permettant la montée en puissance de l'empire. Dès lors, la production d'énergie est devenue un impératif civilisationnel. Les élites de ces pays ont développé une obsession pour ce com-

bustible, qui a fini par dominer les bilans énergétiques. Il a marqué les imaginaires et les paysages avec les mines, chemins de fer, usines centralisées, les pollutions. A partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'électricité et le pétrole façonnent d'autres rapports à l'énergie, fondés sur l'organisation des flux dans les grands réseaux. Mais le phénomène est cumulatif : le fait d'utiliser l'électricité et le pétrole ne s'est aucunement traduit par un renoncement au charbon.

### Comment s'inscrit la révolution du solaire au regard de cette histoire des énergies ?

L'énergie solaire offre la possibilité d'une énergie non fossile à l'heure de la crise climatique. Mais elle ne porte pas en elle-même un projet politique ni une organisation socio-économique. Sans remise en question de la croissance énergétique, l'industrie so-

n'y a pas eu de tels gains d'efficacité ni de réduction de la consommation de carburant.» Par exemple, la quantité de silicium qui constitue la couche photosensible du panneau a diminué des trois quarts, permettant d'économiser les matériaux utilisés. Ces installations voient également leur durée de vie (vingt-cinq ans environ) s'allonger, avec un taux de recyclage de près de 96 %.

Cette rupture technologique n'aurait pu se faire sans le flair des industriels chinois. A coups d'investissements massifs dans des fonderies, ces derniers sont parvenus à industrialiser à grande échelle la production de polysilicium, le matériau à base de quartz, un des plus abondants dans l'écorce terrestre, qui, une fois raffiné et transformé en blocs, entre dans la fabrication des cellules des panneaux solaires. Une force de frappe qui leur a permis de casser l'oligopole de quelques groupes américains, européens et japonais, qui verrouillaient jusqu'alors ce marché. Et de dominer encore aujourd'hui à 93 % l'offre mondiale de polysilicium, et à 80 % celle des panneaux solaires.

A elle seule, la Chine s'arroge plus de la moitié des capacités installées dans le monde. Elle aura d'ailleurs déjà dépassé en 2024 ses ambitions pour 2030, produisant bien plus de panneaux que le monde ne peut en installer actuellement. «Les fabricants chinois ont surinvesti par rapport à la demande, explique Philippe Gauthier. Ils sont tombés dans les mêmes travers que l'industrie pétrolière qui, lorsque ses revenus baissent, les compense en produisant davantage.»

Comme le raconte Alexandra Sombsthay, vice-présidente de l'association Solar Power Europe, «à la suite de l'explosion de la demande post-Covid-19, beaucoup d'entrepreneurs chinois se sont mis à transformer leur ligne de production d'un jour à l'autre en chaîne de fabrication de panneaux, ce qui faisait peser un risque qualité ainsi que réputationnel». Depuis, le gouvernement chinois a freiné l'extension et provoqué la fermeture de certains sites de fabrication.

Il en faudrait plus pour ébranler une domination chinoise que les Etats-Unis et l'Europe tentent de combattre. «Nous devons inciter les industriels européens à être plus actifs pour produire sur le Vieux Continent», insiste Eric Scotto, fondateur d'Akuo Energy, un producteur d'électricité verte, tout en restant pragmatique. «Sans la Chine, l'Europe ne pourrait pas être en mesure de tenir ses objectifs financiers et climatiques», poursuit-il, alors que les fabricants européens ne fournissent que 3 % de la demande en panneaux solaires.

D'autant que l'Union européenne n'a entrepris de soutenir que très tardivement des projets de gigafactories comme ceux portés par les entreprises françaises Carbon et HoloSolis. «Il est très difficile de rivaliser avec les tarifs chinois au minimum deux fois moins chers», confirme Cyrus Farhangi, directeur de cabinet du producteur Corsica Sole. En revanche, cela ne concerne qu'une fraction du coût total d'une installation. «Le prix des panneaux n'entre que pour 15 % des coûts d'investissement d'un projet de centrale solaire, auxquels il faut notamment ajouter ceux de la construction, de la main-d'œuvre ou encore du raccordement», explique-t-il.

A l'occasion du dernier sommet des Nations unies pour le climat, les pays participants se sont donné l'objectif de multiplier par trois la capacité de production d'énergie renouvelable d'ici à 2050. Pour y parvenir, l'énergie solaire produirait, à elle seule, un quart de l'électricité mondiale. Ce changement d'échelle ne se fera pas sans lever des freins sociétaux et technologiques, notamment celui de l'acceptabilité sociale. Même si celle-ci est plus élevée que dans l'éolien, la perspective de voir cette marée de panneaux vitrés coloniser toits, champs et forêts ne manquera pas d'attiser les tensions.

laire ne fera que poursuivre la trajectoire extractive de l'économie fossile. Rappelons que le premier moteur solaire était une machine à vapeur de substitution, elle s'inscrit donc en premier lieu dans l'imaginaire fossile et en l'occurrence, colonial.

Mais à l'inverse, dans les années 1970, les mouvements écologistes y voient une alternative aux énergies fossiles et nucléaires qu'ils associent à la technocratie, au colonialisme et à la destruction de l'environnement. Depuis les années 1990, ce sont les entreprises énergétiques et leurs réseaux alimentés par les énergies fossiles et nucléaires qui se sont emparés des énergies renouvelables. On reste alors dans une logique d'accumulation, même si le solaire voit sa place augmenter dans le «mix» énergétique. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR MARJORIE CESSAC

# À ELLE SEULE, LA CHINE S'ARROGE PLUS DE LA MOITIÉ DES CAPACITÉS PHOTOVOLTAÏQUES INSTALLÉES DANS LE MONDE

Par endroits, c'est déjà le cas, comme dans la vallée du Lot, où TotalEnergies prévoit d'installer une mégacentrale photovoltaïque en plein parc naturel régional des Causses du Quercy, classé pour son patrimoine remarquable. Et ce, alors qu'il serait possible, selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, d'atteindre 100 gigawatts de capacités installées en 2050 en France en se limitant aux espaces artificialisés, comme les parkings et les friches ainsi que les toitures.

Des tuiles solaires plus élégantes aux panneaux qui protègent les cultures des aléas climatiques en passant par les clôtures amovibles laissant passer les animaux, des avancées existent, bien qu'encore peu répandues pour allier ce déploiement à la préservation visuelle et de la biodiversité.

Augmenter la puissance des panneaux permettrait aussi d'en limiter le nombre et l'impact au sol. «Aujourd'hui, le silicium ne capte qu'une partie de l'énergie. Moins d'un tiers des photons sont transformés en électricité», explique David Duca, chef du département des technologies solaires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, en précisant que l'ajout d'une matière minérale comme la pérovskite permettrait d'en absorber davantage. «Pour l'instant, le meilleur rendement d'une cellule qui allie silicium et pérovskite est de 29,8 %, mais nous espérons commencer par le chiffre 3 à la fin de l'année», détaille-t-il.

## MANQUE DE FLEXIBILITÉ

Enfin, cette révolution ne pourra se poursuivre que si la question de la variabilité du solaire parvient à se régler complètement. «La clé sera de s'assurer que les pays disposent d'un réseau suffisant pour transporter l'énergie là où elle est nécessaire, ainsi que de développer une capacité de stockage par batterie pour compléter l'énergie solaire en dehors des heures les plus ensoleillées», insiste Ember dans un rapport publié en septembre.

Les réseaux électriques, à l'origine très centralisés, vont devoir être redimensionnés pour pouvoir accueillir de l'électricité venant d'une foule de sites différents, ce qui devrait nécessiter rien qu'en France 100 milliards d'euros d'investissements. «Quand le soleil est plus fort entre 10 heures et 16 heures, et que la production est élevée, il est plus difficile de l'écouler sur le réseau à un moment où la consommation est plutôt faible», rappelle l'économiste Christian Gollier. Ce manque de flexibilité engendre des prix négatifs au moment des pics de production, comme cela a été le cas en France, en Suisse ou en Australie durant l'été.

Quelques verrous sont cependant en train de sauter. «La même révolution qui a eu lieu sur les panneaux est en train de se passer sur les batteries à dix ans d'intervalle», note Raffaele Rossi, stratège chez SolarPower Europe. Au cours de la dernière décennie, le prix du stockage a effectivement été divisé par dix. Quand la densité de stockage dans un conteneur de batteries a été multipliée par trois depuis 2021. «Cela évolue très vite sur les techniques de fabrication», observe Philippe Gauthier. Il y a deux ans, par exemple, tout le monde craignait une pénurie de cobalt, avant que la situation ne s'inverse à l'automne 2023 avec l'arrivée des batteries lithium-fer-phosphate, au lithium mais sans cobalt, et des batteries au sodium, sans lithium et sans cobalt.

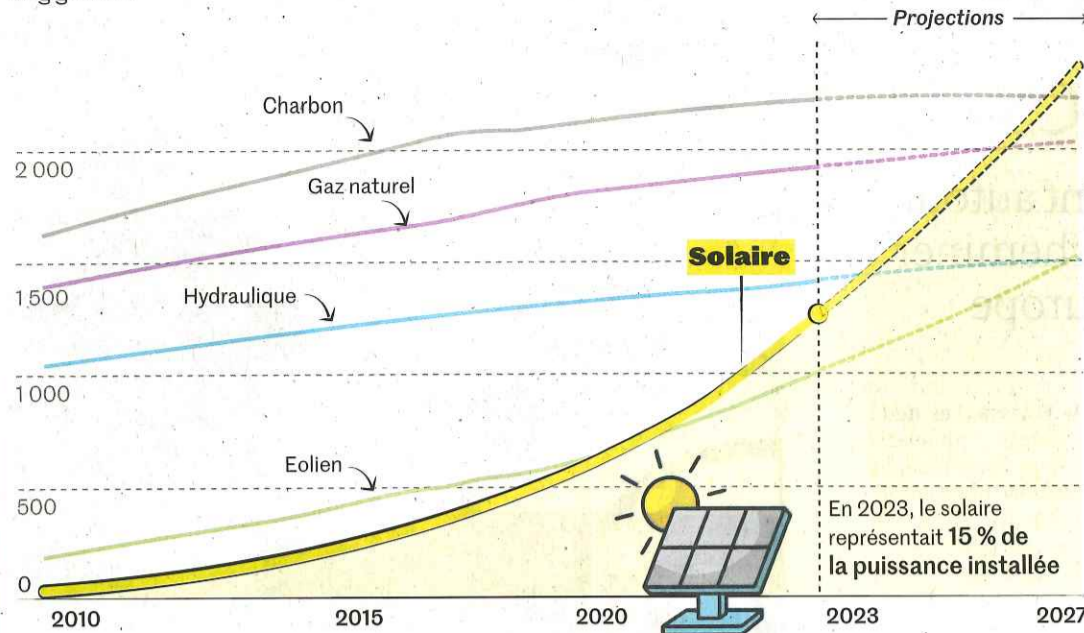
Si l'énergie solaire semble bien partie pour dominer les autres énergies, peu d'experts estiment en revanche qu'elle sera en mesure de les évincer complètement. «A ce stade, l'électricité ne peut pas être stockée de manière fiable, nous avons donc besoin d'une autre source d'énergie lorsque le soleil ne brille pas, surtout en hiver lorsqu'il fait sombre et froid», insiste Loyle Campbell, expert au Conseil allemand des affaires étrangères.

Des changements comportementaux seront également nécessaires pour mieux faire coïncider par la souplesse et la sobriété ces moments de forte production à leur consommation. Faudra-t-il recharger sa voiture en milieu de journée pendant les heures de travail? Des tarifs incitatifs suffisent-ils pour moins consommer? Autant de questionnements qui font de plus en plus l'objet de recherches académiques dont les travaux ne font que commencer. Le pétrole n'a pas encore perdu la bataille contre le solaire, mais ses jours sont comptés. ■

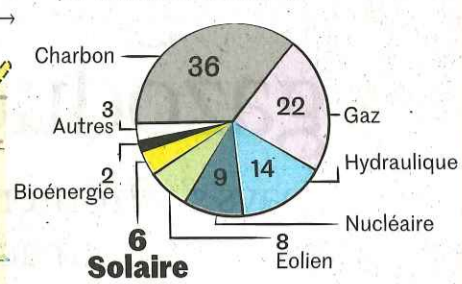
MARJORIE CESSAC

# Le photovoltaïque en plein essor

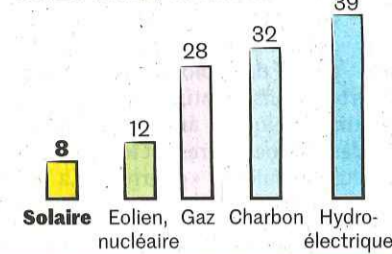
Puissance installée par source d'énergie dans le monde, en gigawatts



Production mondiale d'électricité par source, en 2023, en %



Temps qu'il a fallu à chaque énergie pour atteindre une capacité de production de 1 000 térawattheures dans le monde, en années



## Une technologie à bas coût qui concentre les investissements

Investissements annuels par énergie renouvelable dans le monde, en %

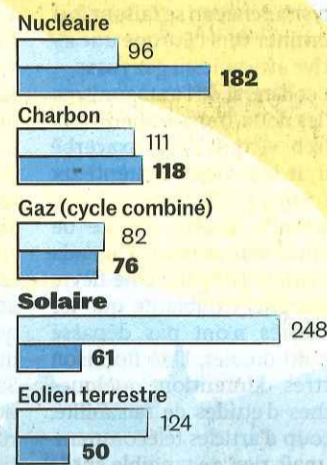


Aujourd'hui, les énergies renouvelables concentrent quasiment deux fois plus d'investissements que les énergies fossiles

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

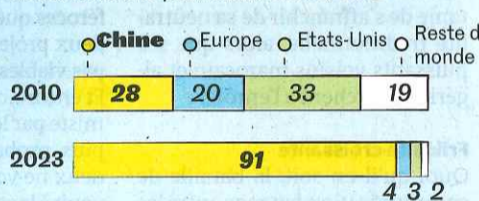
□ 2010 □ 2024

\*Hors subventions, sans prendre en compte le coût du transport et du stockage

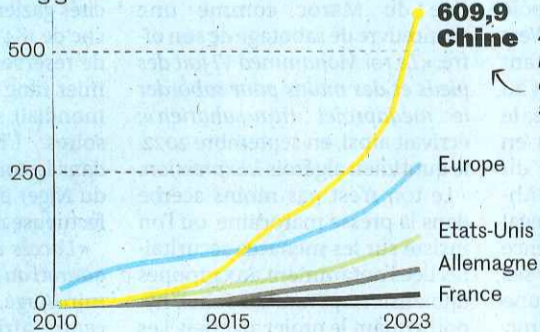


## Un marché très largement dominé par la Chine

Part de marché dans la production mondiale de polysilicium, matériau de base pour la fabrication des cellules des panneaux solaires, en %

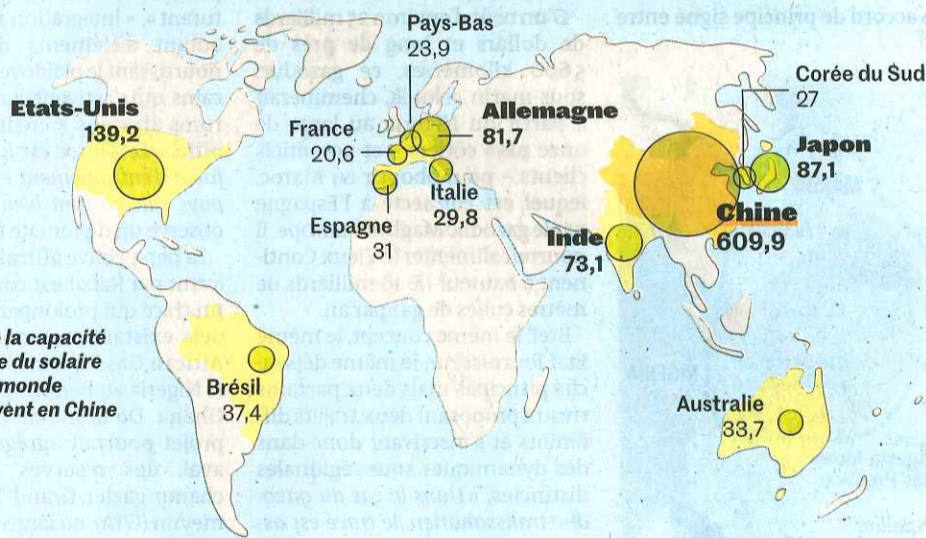


Evolution de la capacité installée du solaire, en gigawatts



43% de la capacité installée du solaire dans le monde se trouvent en Chine

Puissance solaire installée supérieure à 20 gigawatts, par pays, en 2023



Infographie : Le Monde, Benjamin Martinez, Sarah Berri  
Sources : IEA, Our World in Data, Ember, Lazard LCOE, Roland Berger, Irena

## Une solution potentielle pour 600 millions d'Africains

EN 2023, EASY SOLAR s'est illustré parmi les entreprises africaines les plus dynamiques (selon la croissance de son chiffre d'affaires) dans le dernier classement annuel du *Financial Times*. Cette société fondée en 2016 par Nthabiseng Mosia fournit aujourd'hui de l'électricité solaire à plus de 1 million de foyers et d'entreprises dans les zones reculées du Liberia et de la Sierra Leone, qui à eux deux comptent une population de plus de 14 millions de personnes.

Certes, la route est encore longue car 600 millions d'Africains n'ont toujours pas accès à l'électricité sur une population de plus de 1,3 milliard d'habitants. Et le continent ne produit à ce jour que 3 % de l'énergie solaire dans le monde. Pourtant, l'énergie photovoltaïque se déploie à petite échelle, dans les zones qui n'ont pas accès au réseau électrique. «De nombreuses petites entreprises se sont lancées dans le secteur il y a dix-quinze ans, mais le taux d'échec était assez élevé», se

souvent David Munnich, directeur exécutif chez Investisseurs & Partenaires, qui constate aujourd'hui une forme d'«éclosion» en faveur des modèles économiques qui fonctionnent.

Certaines de ces sociétés comme PEG au Ghana vendent des kits solaires pour s'éclairer, alimenter des petits appareils ménagers, avec la possibilité d'un paiement fractionné de quelques euros par mois. D'autres, telles que Cogelec au Sénégal, installent des miniréseaux dans des villages ou des zones plus denses.

### «Mini-EDF»

«On observe aussi de plus en plus de convergence entre le public et le privé avec les entreprises du réseau électrique national qui confient à des sociétés privées la gestion de certains territoires», poursuit M. Munnich, expert de l'investissement en Afrique. Si le secteur souffre d'un problème de financement chronique, notamment

pour maintenir et développer les grands réseaux, il a également vu émerger depuis une décennie plusieurs dizaines de fonds d'investissement internationaux pour soutenir ces entrepreneurs privés.

Des expériences sont également menées dans le secteur du tourisme et des transports. En Tanzanie, Denis Leboutoux, fondateur et président de Tanganyika Expéditions, alimente sur ses propres deniers depuis plusieurs années ses hôtels et ses Jeep en électricité solaire. «C'est globalement très rentable», indique cet entrepreneur qui a déployé un «mini-EDF» à base de batteries stationnaires reliées à des panneaux solaires au sein de ses lodges.

A ce jour, ses véhicules de safari servent de vitrine à E-Motion. Pour cette société, Denis Leboutoux s'est associé avec le groupe Hanspaul, spécialisé dans la conversion de voitures thermiques, et Gadgetronix, qui installe des fermes solaires. «Nous remplaçons le

moteur des vieilles Jeep par des batteries lithium-fer-phosphate», détaille l'ingénieur Neelkanth Govindji chez E-Motion alors que 18 ont déjà été converties.

Pour l'instant, la start-up n'a qu'un seul client, mais le concept intéresse le gouvernement tanzanien et des entreprises pour électrifier des bus scolaires ou des véhicules de livraisons. «On peut convertir tous types de voitures. Cela prend deux semaines environ», souligne-t-il, en précisant que les batteries ne cessent de s'améliorer.

L'enjeu des transports est l'un de ceux qui suscitent le plus d'intérêt. «On voit apparaître de plus en plus de projets sur ce secteur, notamment autour des motos électriques», confirme David Munnich. En janvier, l'Ethiopie a d'ailleurs interdit l'importation de véhicules à essence ou diesel pour pousser l'électrique... même si le pays ne comptait en septembre qu'une seule borne de rechargement. ■

M. CE.