



Les toitures solaires

Problématique

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus répandue sur terre. Elle est aussi la plus abondante. A l'inverse des sources d'énergie fossile, elle a un atout majeur, celui d'être distribuée. Elle est par contre intermittente et variable, au gré du cycle jour-nuit et des sages nuageux.

Toute surface exposée au soleil est capable, grâce à l'effet photovoltaïque, de produire un courant électrique proportionnel à l'irradiation reçue. Le rendement encore faible de l'effet photovoltaïque, de l'ordre de 18 à 22 % pour le silicium cristallin, requiert de grandes surfaces afin que la contribution du photovoltaïque au bilan de la production électrique soit significative. La production annuelle d'énergie électrique produite par un générateur solaire varie d'environ 300 kWh/kW_{crête} pour les sites à faible ensoleillement, à plus de 2 000 kWh/kW_c en pays tropical ; dans les pays tempérés, on considère une production annuelle moyenne de 1 000 kWh/kW_c.

L'utilisation exclusive des sols pour l'installation de centrales solaires, pénaliserait les atouts environnementaux de cette technologie. Or, les toitures, exposées au ciel, sont des surfaces disponibles qui, au-delà de leurs fonctions d'étanchéité et de protection des bâtiments, sont susceptibles de produire de l'électricité une fois équipées de modules solaires photovoltaïques. Les superficies libres des toitures ne peuvent donc être négligées.

Dans les pays d'Afrique subsaharienne, l'électricité produite par des toitures solaires est consommée sur place, de façon autonome et indépendante du réseau national. Lors des coupures d'électricité, elle permet aux habitants connectés au réseau national de disposer d'une source alternative d'électricité, palliant les insuffisances de la production électrique distribuée par la société nationale d'électricité. Seules quelques expérimentations très ponctuelles, à titre de recherches, mettent en œuvre des générateurs solaires connectés à un réseau de distribution électrique. Leur généralisation contribuera à réduire les pertes dans les réseaux de distribution électrique.

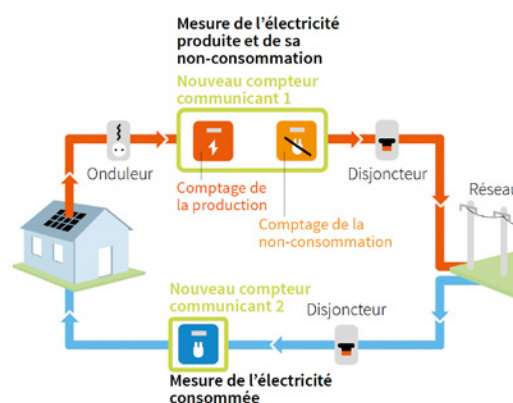
Dans les pays industrialisés, l'électricité produite par des toitures solaires est utilisée selon plusieurs modes : l'injection sur le réseau en totalité ou l'autoconsommation, totale ou partielle (figures 1 à 3). Dans ce dernier cas, le surplus non consommé sur place est injecté sur le réseau.

Aujourd'hui, dans le monde, plusieurs millions de toitures sont équipées de modules solaires, contribuant à près de 1 % de la production mondiale d'électricité.

Les préoccupations environnementales, manifestées par des incitations fiscales et la chute des prix des composants solaires, au premier rang desquels les modules solaires, dont les prix ont baissé de 95 % de 1988 à aujourd'hui, ont favorisé ce développement.

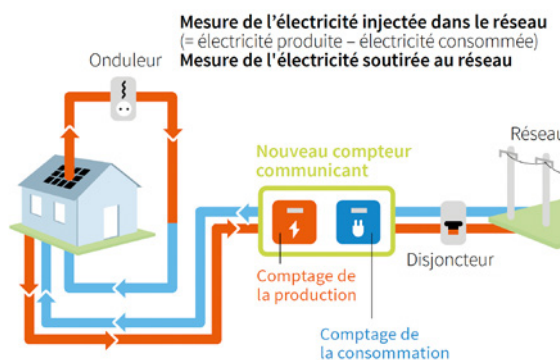
Qu'elles soient institutionnelles, techniques, économiques et financières, des modalités particulières ont été élaborées et mises en œuvre pour la généralisation de cette application de l'énergie solaire. Quelles sont-elles ? Quels en sont les enjeux, que ce soit en pays industrialisés ou non ? Tel est l'objet de cette fiche.

Figure 1. Production injectée dans le réseau



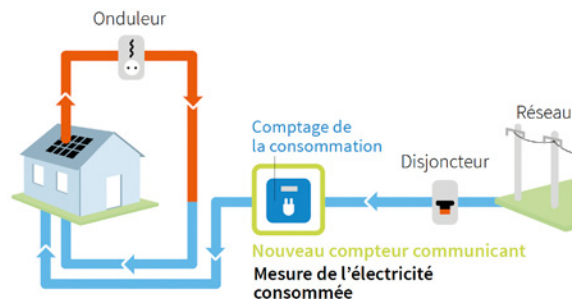
Source : ADEME / Agence Giboulées (reproduction autorisée)

Figure 2. Production consommée et surplus injecté dans le réseau



Source : ADEME / Agence Giboulées (reproduction autorisée)

Figure 3. Production intégralement consommée



Source : ADEME / Agence Giboulées (reproduction autorisée)

Principes de base

Le terme de « toiture » couvre un large champ de situations diverses, des toitures de maisons d'habitation, de bâtiments à usages commercial et industriel jusqu'aux hangars agricoles et ombrières de parking.

Historiquement, le schéma de production et de distribution électrique s'est construit sur des unités de production concentrées, de puissance élevée, du MW au GW, et stable, détenues par un nombre d'acteurs professionnels limité et distribuant l'électricité via des réseaux de transport et de distribution. L'introduction de toitures solaires change la donne en laissant la voie à la création d'une multitude d'unités de production électrique disséminées sur l'ensemble du territoire, variable et de faible puissance, du kW_c à la dizaine voire centaine de MW_c, détenues par une multitude de propriétaires individuels dont certains sans culture électrique approfondie.

Enfin, sous réserve de considérer les caractéristiques des toitures et des bâtiments qui les supportent, tous les édifices sont en mesure d'intégrer un générateur solaire. Superficies disponibles, orientation, construction, usages, contraintes de sécurité, diffèrent selon le type de bâtiments.

Les maisons d'habitation

Le choix d'une installation de toiture solaire par un particulier est souvent l'aboutissement d'une démarche incluant des considérations écologiques et financières (voir l'étude de cas).

Les contraintes de superficies de toiture disponibles limitent les puissances installées à quelques kW_c, de l'ordre de 3 à 10 kW_c. Les contraintes de rentabilité de l'investissement, cherchant à maximiser la production électrique, conduisent à équiper les toitures faisant face au sud ou au nord, selon l'hémisphère. Quelques exceptions météorologiques ou d'ombrage peuvent cependant conduire à des orientations vers l'est ou l'ouest. Des logiciels en libre accès permettent aujourd'hui de simuler les productions annuelles selon les sites et l'orientation des générateurs.

Même sans réglementation particulière s'y rapportant, les contraintes esthétiques nécessitent que les modules soient disposés dans le même plan que la toiture par deux mécanismes de fixation possibles :

- La *surimposition* vise à assembler les modules solaires sur une structure, elle-même fixée sur la toiture, chacun des composants gardant sa fonction unique : la toiture protège le bâti, les modules produisent de l'électricité. Plus simple et moins onéreuse que la seconde option, elle est réalisée au détriment de l'esthétique.
- L'*intégration à la toiture* vise à fondre les modules solaires au sein même de la toiture, leur donnant la double fonction de protection du bâti et de production d'électricité. Les « tuiles solaires », remplaçant une couverture traditionnelle, peuvent ainsi couvrir la totalité d'une toiture. Cette alternative, quoique plus onéreuse d'environ 30 % et plus complexe que l'option de surimposition, amorce sa pénétration du marché et elle est considérée comme particulièrement prometteuse ; c'est notamment l'option qui a été retenue par Tesla pour se lancer dans le photovoltaïque ; l'entreprise italienne Dyaqua, l'entreprise française Imerys sont d'autres exemples de fabricants de tuiles solaires, dont le nombre se développe.

Encadré 1. Les tuiles solaires

Si la majorité des toitures solaires sont, à ce jour, équipées de modules solaires, les mêmes que ceux qui constituent les centrales au sol, celles de maisons d'habitation peuvent être réalisées à partir de tuiles solaires, de même format que les tuiles traditionnelles et capables de remplacer des ardoises dont elles reprennent la tonalité chromatique.

Elles ont l'avantage de ne pas modifier la constitution du toit, de ne pas le fragiliser par l'adjonction de composants extérieurs et de couvrir, à l'inverse des modules solaires, la totalité d'un toit. Cette option, dont la fourchette de coûts varie de 5 à 10 €/W_c, s'avère encore à ce jour, plus onéreuse que celle des modules solaires, fabrication et pose requérant en effet une main d'œuvre plus importante.

Au-delà des tuiles solaires photovoltaïques, il existe des tuiles solaires thermiques qui permettent de transformer l'énergie solaire en chaleur pour l'eau chaude sanitaire par exemple, et des tuiles hybrides, qui combinent la production d'électricité et de chaleur.

Les bâtiments commerciaux et industriels

Les grandes toitures des bâtiments à usages économiques, entrepôts, usines, sont habituellement inutilisées alors qu'elles représentent un capital de surfaces disponibles très important. A titre d'exemple, les surfaces construites annuellement pour de tels bâtiments en France représentent environ 12 millions de m².

La démarche conduisant à l'installation de générateurs solaires sur de telles toitures est souvent triple : une réduction du coût de l'électricité lorsque celle-ci est auto-consommée, l'amélioration du bilan carbone et une image dynamique et responsable.

Alors que la pente des toitures de maisons d'habitation permet l'installation de modules directement dans leur plan, l'horizontalité des toitures des locaux commerciaux et industriels peut requérir la mise en place de supports garantissant une orientation solaire propice à la production photovoltaïque tout en limitant la prise au vent. Les logiciels de dimensionnement permettent de retenir le meilleur compromis entre performances et coût de mise en œuvre.

Une plus grande intégration au bâti, par la réalisation de modules aux dimensions spécifiques épousant la forme de la construction et apportant un complément d'esthétique, se limite aujourd'hui à quelques réalisations de prestige, compte tenu des surcoûts qu'elle entraîne.

Les puissances des générateurs solaires en toiture de bâtiments industriels et commerciaux sont à l'image des grandes superficies disponibles. Sur un même site, de nombreux bâtiments peuvent accueillir des modules solaires permettant d'atteindre des puissances installées très importantes. La plus grande installation, à ce jour, est de 120 MW_c à Shandong, en Chine.

Les hangars agricoles

Les grandes superficies des hangars agricoles, leur facile orientation au sud compte tenu de l'absence de voisinage, leur couverture sommaire sans fonction d'isolation, représentent des situations favorables à l'installation de générateurs solaires de forte puissance, pouvant atteindre quelques centaines de kW_c.

Les rendements financiers qu'ils engendrent sont des arguments de poids pour l'implication des agriculteurs dont les revenus sont aléatoires et faibles. A ce titre, ils représentent plus de la moitié des installations sur toiture en France.

Toiture de hangar agricole de 200 kW_c à Cumillé en Anjou (France)



Crédit photo : Étienne Sauvage

Toutefois, leur généralisation en milieu rural est contrainte par les capacités de raccordement du réseau électrique et d'absorption des postes de transformation qui n'ont pas été conçus pour faire transiter de fortes puissances. Par exemple, aujourd'hui, dans des zones à très faible densité de raccordements en France, les autorisations de construire ne sont pas accordées et des projets sont reportés, voire annulés. En effet, l'absence d'autoconsommation en journée, à l'inverse des toitures industrielles, contraint à vendre la totalité de l'énergie produite au gestionnaire du réseau qui doit alors s'atteler au renforcement de ses lignes à basse et à moyenne tensions pour ne pas retarder, voire bloquer, la mise en œuvre de projets d'envergure.

Les ombrières de parking

Les aires de stationnement sont des surfaces planes et libres, souvent dégagées de toute végétation. Exposées à la lumière du jour, elles représentent d'excellentes opportunités pour être dotées d'un « toit » susceptible d'être équipé de modules solaires. Ils sont alors appelés *Ombrière*.

Sans être de véritables toitures, elles améliorent le confort des clients en créant de l'ombre et d'éventuels abris en cas de pluie. Tout en valorisant une superficie exposée au soleil. Contrairement aux hangars agricoles, leurs orientation et inclinaison sont dictées par des considérations extérieures : orientation des emplacements de stationnement, contraintes esthétiques et environnementales. Les projets se multiplient dans des stationnements variés et de tailles diverses (aéroports, parcs d'exposition, hôpitaux, etc.).

De l'usage de l'électricité produite

Quelles que soient les conditions d'installation, l'électricité produite peut être soit vendue, soit consommée sur place, c'est alors l'autoconsommation. Un mix des deux modalités est possible :

- *Vendue* : à l'apparition des toitures solaires, dans les années 80 et 90, la seule option technique possible était de vendre la totalité de l'électricité produite au gestionnaire de réseau à un prix fixe garanti sur une durée donnée, de l'ordre d'une vingtaine d'années. Au fur et à mesure du développement de la filière, de nouvelles modalités de vente se sont développées avec des ventes partielles (voir le point suivant), ou bien vendue à un client particulier. Si l'électricité produite participe au verdissement du système électrique, elle complexifie la gestion du système par un apport intermittent et variable d'électricité. En milieu rural, les puissances délivrées par les toitures de grande superficie requièrent fréquemment des modifications des infrastructures électriques existantes.
- *Auto-consommée* : l'électricité n'est pas vendue mais consommée au sein même de l'installation électrique du bâtiment supportant la toiture solaire, voire au sein d'une communauté de producteurs d'électricité solaire. Aussi, est-il nécessaire que le mode de consommation électrique de l'utilisateur, ou du groupe d'utilisateurs, soit adapté au cycle solaire. Si les activités industrielles et commerciales se prêtent bien à cette tem-

poralité, l'usage des appareils ménagers à forte consommation électrique doivent être programmés sur les heures d'ensoleillement. La baisse du prix du stockage, l'augmentation du prix de l'électricité et les autorisations administratives récentes participent à la croissance du marché des toitures solaires en autoconsommation qui représentaient en 2019 environ 70 % du marché européen. L'autoconsommation, si elle est avantageuse pour l'utilisateur compte tenu de la différence croissante entre le coût de l'électricité solaire et celle du réseau, l'est moins pour le gestionnaire du réseau électrique qui voit une réduction de l'énergie transportée et une baisse de ses recettes. Sa mission de service public, manifestation de la solidarité nationale, pourrait alors en être affectée.

Description technique des systèmes

Les différentes configurations de toitures solaires, des résidences d'habitation aux hangars agricoles et bâtiments industriels, montrent combien les tailles des générateurs solaires couvrent une très large gamme de puissance. Les générateurs les plus modestes ne dépassent pas les dix modules solaires, soit de 3 à 4 kW_c, alors qu'entrepôts et locaux industriels peuvent recevoir des générateurs de quelques centaines de kW_c, voire de plusieurs MW_c.

Quels que soient leurs tailles et les bâtiments les supportant, les toitures solaires comportent les composants habituels des systèmes photovoltaïques.

Les *modules solaires*, installés en toiture et dont la puissance unitaire peut atteindre 450 W_c pour environ 2 m², sont simples et leur fonctionnement ne demande aucune attention particulière. Leur poids, d'environ 20 kg/m², nécessite de considérer la charge supportable de la toiture. Les modules installés en toiture ne requièrent aucun entretien particulier, au-delà d'un lavage régulier dans certains cas : en climat tempéré, les pluies assurent un nettoyage régulier ; en pays tropical, la couche de poussière qui s'y dépose affecte le rendement, nécessitant un lavage régulier.

Les *systèmes de fixation*, intégrés en toiture ou surimposés, ne doivent affecter ni la solidité ni l'étanchéité du toit. Si les modules solaires des maisons d'habitation et des hangars agricoles épousent leur pente, ceux des bâtiments industriels disposent fréquemment de châssis leur procurant une inclinaison optimale.

Le *convertisseur* est un composant majeur. Il transforme le courant continu issu des modules solaires en courant alternatif compatible avec le réseau de distribution d'électricité. Des micro-onduleurs peuvent être fixés directement sous chaque module, ou bien des onduleurs par branche (*string*) peuvent être installés, situés aux bornes d'une rangée de modules ou par sous-générateurs, convertissant l'énergie produite par un sous-ensemble de modules. Si chaque option comporte des atouts et des limites, aucune ne semble faire aujourd'hui l'unanimité des acteurs. Certains privilégient la première option, rendant chaque module-onduleur indépendant, quelles que soient, par exemple, les différences

d'irradiation sur différentes parties du générateur. D'autres préfèrent un accès facile à l'unique onduleur.

Un *système de télémonitoring* et de comptage complète l'ensemble pour un suivi du fonctionnement, une analyse des performances et la facturation de l'énergie vendue.

Enfin, des *batteries* peuvent compléter l'installation pour un plus large taux d'autoconsommation, voire une totale autonomie. Dans les pays en développement, elles visent à pallier les pannes du réseau électrique. La gamme des technologies, entre la traditionnelle plomb-acide et celles faisant appel à de nouveaux matériaux, s'élargit dans une dynamique générale de réduction des coûts. Si les batteries conventionnelles au plomb sont contraignantes (décharge limitée, entretien régulier, durée de vie limitée), celles faisant appel aux nouveaux couples électrolytiques, dont les batteries lithium-ion, permettent une plus grande flexibilité d'utilisation mais au prix d'un système de régulation plus complexe et d'un coût encore significativement plus élevé.

Au-delà de ces composants, propres à tout système solaire, le raccordement au réseau nécessite l'installation de composants complémentaires, allant d'un simple compteur associé aux dispositifs de sécurité nécessaires à des équipements beaucoup plus importants, transformateurs-élévateurs de tension, disjoncteurs, etc. D'éventuels renforcements de ligne et installation de transformateurs peuvent être requis si les puissances à transiter est supérieure à la capacité du réseau local.

Stratégies de mise en œuvre et résultats attendus

Politiques incitatives nécessaires

Le développement des toitures solaires répond à la volonté des Etats et de la société civile de participer à la transition énergétique : réduire les émissions de gaz à effet de serre, éviter la dépendance aux énergies fossiles et la prolifération de déchets issus des réacteurs nucléaires tout en élargissant le champ des investisseurs au plus grand nombre.

Même si le coût du kWh produit est de l'ordre du double de celui issu des centrales solaires au sol, les toitures solaires bénéficient de trois atouts majeurs : la préservation de terres agricoles, l'implication de tous les acteurs de la société civile, au-delà des Etats et des grands acteurs de l'électricité, répartissant l'effort financier d'un changement de paradigme électrique, et finalement, la participation à la création de réseaux d'installateurs sur l'ensemble des territoires.

Ce développement des toitures solaires requiert toutefois une évolution des modèles d'organisation du secteur électrique, en place depuis des décennies et ayant fait leurs preuves, afin d'en assurer la flexibilité nécessaire à l'intégration d'une production très large-

ment décentralisée. Les réseaux intelligents, gérant efficacement les flux d'électricité, anticipant et maîtrisant les effacements éventuellement nécessaires, offrent des solutions capables d'intégrer les spécificités des énergies renouvelables dont l'énergie solaire.

Dans les pays du nord, ce changement de paradigme contraint les puissants acteurs traditionnels de l'électricité à participer à une révolution qu'ils n'ont pas toujours souhaitée. A ce titre, la volonté politique matérialisée, entre autres, par des incitations fiscales et financières vers les investisseurs par des crédits d'impôts et des tarifs garantis, est indispensable à l'évolution du marché, aussi facilitée par la baisse constante des prix des composants solaires (le W_c qui valait 70 € en 1988 vaut 0,4 € en 2021) et les changements générationnels de mentalité (les jeunes sont beaucoup plus réceptifs que leurs aînés aux risques des technologies polluantes et aux sources d'énergie épuisables) !

Dans les pays en développement, la diffusion des toitures solaires répond à deux impératifs : à court terme, satisfaire la demande individuelle en électricité pendant les périodes de délestage ; à plus long terme et une fois les questions techniques résolues, alléger la sollicitation des centrales thermiques aux cotés des grandes centrales photovoltaïques.

La nécessaire flexibilité des politiques

Politique volontariste et incitations sont efficaces mais représentent, pour les états, des engagements financiers importants et de long terme, de l'ordre de 20 ans, pour assumer les efforts financiers d'une tarification incitative. Ils sont d'autant plus lourds que le succès des politiques incitatives est grand. Aussi, les outils d'incitation doivent être flexibles et ajustables pour que les gains induits soient également répartis entre investisseurs privés et puissance publique.

La mise en place, par les états et les collectivités territoriales, d'incitations financières attractives facilitant l'investissement d'acteurs privés est indispensable. Elles prennent la forme de subventions ou crédits d'impôts pour l'acquisition de systèmes solaires et d'une tarification avantageuse sur une durée donnée, de l'ordre d'une vingtaine d'années, assurant un retour sur investissement intéressant. Ces mesures incitatives doivent être bien planifiées, par exemple avec un mécanisme associant réduction progressive des tarifs et limitation du nombre de nouveaux raccordements, pour éviter les risques associés à une trop grande attractivité financière. En 2010, la France a ainsi dû revoir radicalement ses mécanismes d'aide pour ne pas mettre en danger, sur le long terme, les finances publiques.

Réglementation

Dans plusieurs pays, l'intégration de toitures solaires dans le bâtiment s'inscrit dans les réglementations du secteur du bâtiment. En France, par exemple, la nouvelle réglementation environnementale RE 2020, mise en place fin 2020 et remplaçant la réglementation thermique, oblige à la neutralité énergétique des bâtiments et jette les bases de constructions à énergie positive (BEPOS). Cette nou-

velle réglementation stipule que les nouveaux bâtiments d'une emprise au sol supérieure à 1 000 m² devront être pourvus d'un système de production d'énergie renouvelable ou des toitures végétalisées sur 30 % au moins de leur surface disponible. Cette obligation sera de plus en plus stricte dans les prochaines années et très clairement un accélérateur au développement des toitures solaires photovoltaïques.

Sécurité et qualité

Il est recommandé que les mesures incitatives soient accompagnées de la définition et la mise en pratique des conditions de sécurité des installations dans le cadre d'une étroite collaboration entre les acteurs économiques, tels que promoteurs, architectes, maîtres d'ouvrage, bureaux de contrôle, assurances, et les pouvoirs publics, tels que ministères concernés et services préfectoraux, pompiers. Un renforcement et un contrôle du professionnalisme des intervenants, fabricants de composants, installateurs et maintenanciers, doivent également être mis en place car l'effet d'aubaine favorise l'émergence de nouveaux venus, sans compétences dans le secteur électrique et le photovoltaïque. L'établissement de normes et la création de qualifications associées à des cycles de formation en électricité et étanchéité de toiture, agréant fournisseurs et installateurs, permettent d'assurer le respect des règles de l'art et conditions de sécurité nécessaires, principalement en ce qui concerne les risques d'électrocution et d'incendie.

Ainsi, l'implication des assureurs est indispensable, particulièrement dans le cas des installations sur des bâtiments industriels et commerciaux.

Les démarches requises par les investisseurs, les particuliers, les entreprises, les fonds, sont généralement complexes, impliquant le choix du meilleur modèle d'affaires (autoconsommation totale ou partielle, location de toiture, vente de la production, etc.), l'obtention d'aides éventuelles et de prêts, comme pour tout projet d'investissement, et finalement, l'autorisation de raccordement auprès du gestionnaire du réseau électrique. L'absence de culture électrique poussée de ces acteurs et la complexité des démarches conduisent habituellement les acteurs à s'entourer de conseils professionnels. De multiples sociétés proposent leurs services en ce sens, accompagnés de modèles d'affaires diversifiés. Il est important de vérifier la qualité, voire la certification, de ces sociétés.

Modèles d'affaires

Plusieurs modèles d'affaires coexistent, selon les puissances installées. Pour les installations de faible puissance, de 1 à 100 kW_c environ, deux modèles d'affaires sont envisagés.

- *L'acquisition* : le propriétaire du bâtiment achète un générateur solaire et bénéficie des aides éventuelles à l'investissement et des tarifs incitatifs. L'installation doit être réalisée par une entreprise compétente. Son homologation par un organisme habilité est indispensable pour s'assurer du bon fonctionnement des équipements et leur sécurité. Tous les frais initiaux et de fonctionnement sont à la charge du maître d'ouvrage.

- *La location de toiture* : Le propriétaire du bâtiment, qu'il soit particulier, agriculteur ou industriel, met sa toiture à disposition d'un investisseur, dans le cadre d'un contrat de location. Ce dernier investit dans l'infrastructure solaire, gère son entretien et sa surveillance et devient alors propriétaire de l'électricité produite. Il en vend la production électrique sous la forme d'une somme forfaitaire à la signature du contrat ou, sous la forme d'un loyer, tout au long de la durée de vie des équipements, au propriétaire du bâtiment.

Pour des puissances plus élevées, la rémunération issue de la vente d'électricité peut être garantie de plusieurs façons.

- *Par un contrat de rémunération sur appel d'offres* : à l'issue d'une consultation lancée par le gestionnaire du réseau électrique, le fournisseur retenu est celui qui propose le meilleur prix du kWh. Si les prix négociés varient d'un pays à l'autre et selon de multiples critères dont la puissance des générateurs, ils s'inscrivent dans une fourchette de 0,09 à 0,07 €/kWh, similaire voire inférieure à celle des prix de l'électricité fournie par les gestionnaires de réseau.
- *Par un contrat de gré à gré* : ce modèle consiste à négocier, entre producteur et consommateur de l'électricité solaire produite, l'achat de l'électricité produite à un prix et sur une période donnée.

L'appui de juristes est indispensable pour définir les modalités des

contrats nécessaires à la mise en œuvre des deux dernières modalités principalement en raison et des multiples facteurs d'évolution qui peuvent se produire au cours des longues périodes des engagements.

Pays industrialisés et pays en développement, quelles différences d'approche ?

Si les pays industrialisés se sont lancés dans des politiques d'appui aux toitures solaires, même si l'ensoleillement est faible, il n'en est pas de même dans les pays émergents ou en développement. La situation du secteur électrique, les capacités financières des intervenants et les contraintes techniques en sont les principales raisons, en dépit de conditions climatiques très favorables.

Les pays industrialisés voient dans cette application de l'énergie solaire une opportunité de diversifier leurs sources d'énergie en l'intégrant dans le système électrique actuel, les pays en développement y voient une opportunité de palier les limites de leur système électrique. Le coût du photovoltaïque, malgré sa baisse spectaculaire récente, n'est cependant pas à la portée du grand public de ces pays, limitant les perspectives de développement des toitures solaires.

Encadré 2. Survol des expériences de différents pays

La Chine est le pays leader avec plus de 100 GW_c installés en toiture solaire. Le rythme annuel d'installations dépasserait les 12 GW_c en 2019, tandis que la croissance du parc européen approcherait, en 2021, les 20 GW_c par an.

L'Allemagne, pays pionnier, dispose d'un parc d'environ 1,5 millions d'installations pour un total de 13 GW_c et 7 % de la production nationale. Le rythme annuel de nouvelles installations dépasse les 3,5 GW_c. Le pays a opté pour les toitures solaires pour la préservation de son sol.

En Europe, le parc de toitures solaires est estimé à environ 70 GW_c à la fin de 2019, représentant 60 % du parc des centrales et toitures solaires de 117 GW_c installés, avec une croissance de 15 à 20 % par an. Pour les seuls usages industriels et commerciaux, entre 2 et 3 GW_c sont installés tous les ans depuis 2015 et le parc devrait atteindre 570 GW_c en 2030, selon SolarPower Europe.

Selon l'Association canadienne de l'énergie renouvelable, le parc de toitures solaires au Canada approche les 50 000 installations pour une puissance installée de 1,18 GW_c. La croissance annuelle est d'environ 118 MW_c. Aux États Unis d'Amérique, selon le groupe Wood Mackenzie, le parc de toitures solaires devrait approcher les 3 millions d'installations fin 2021 et atteindre les 4 millions en fin de 2023. En 2020, 30 % des 19,2 GW_c installés, l'ont été en toiture, soit près de 6 GW_c.

Si les statistiques sont nombreuses en ce qui concerne les pays industrialisés, il n'est pas à ce jour possible d'apprécier les parcs et leurs évolutions dans les pays du continent africain, la part du marché informel étant encore prépondérante. Le dynamisme du marché des centrales solaires laisse à prévoir un décollage de celui des toitures solaires. Par exemple, l'École Supérieure Polytechnique de la Jeunesse, à Ouagadougou, a décidé d'installer deux générateurs solaires, disposés en toiture. Ces derniers fournissent le courant électrique à tout le bâtiment administratif, hormis les climatiseurs trop gourmands. Les motivations sont la réduction de la facture d'électricité, la garantie d'accès à un minimum d'électricité lors des délestages, la disponibilité d'une plate-forme de tests pour les élèves et la promotion d'une innovation technologique.

L'Inde montre une volonté forte de faire appel à l'énergie solaire tout en limitant l'emprise sur les terres cultivées. Le programme des toitures solaires connectées (*Grid-connected Roof Top Solar programme*) vise à installer 40 GW_c de toitures solaires d'ici 2022 dont la majorité des installations visera des bâtiments publics. D'ici cette échéance, le Kerala, à l'extrême sud-ouest du pays, vise par exemple, l'installation de toitures solaires pour 1 GW_c afin de répondre à 30 % des besoins en électricité de la région.

Tous ces estimations montrent le dynamisme de cette filière, dont le développement accéléré est attendu dans le cadre de la lutte contre le changement climatique.

Avec l'appui des agences en charge des énergies renouvelables, des prêts bancaires sont toutefois proposés pour l'acquisition de petits générateurs autonomes pour garantir la continuité du service pendant les périodes de délestage. À l'inverse, ce sont les compagnies d'électricité locales qui ont recours à des contrats d'achat d'électricité auprès d'opérateurs étrangers investissant dans des centrales solaires de plusieurs dizaines, voire centaines de MW.

Il faut cependant saluer les stratégies dynamiques des pays émergents, comme le Maroc ou la Tunisie, dont les gouvernements, en étroite collaboration avec leurs sociétés d'électricité, favorisent l'émergence de cette filière.

Conclusion

Les toitures solaires représentent une formidable opportunité de participer à la transition énergétique et écologique.

Leur généralisation, dans les pays industrialisés, dépend de mesures normatives imposant l'installation de toiture solaire sur tout nouveau bâtiment. Dans les pays émergents et en développement, de très nombreux toits sont équipés de modules solaires, sans qu'il soit encore possible de parler de toitures solaires dotées des garanties de performance et de sécurité nécessaires. Des outils financiers pertinents et un renforcement de compétences techniques sont encore nécessaires pour un large développement des toitures solaires.

Leur banalisation assurera une contribution massive à la production électrique sans porter atteinte au capital des surfaces agricoles, une participation significative à la lutte contre le changement climatique et une opportunité de nouveaux emplois. Enfin, si les innovations en termes de stockage d'électricité et de réseaux intelligents laissent présager la possibilité de palier l'intermittence de l'énergie solaire, de nouveaux champs de développement restent ouverts.

Références

- ADEME. 2019. L'électricité solaire <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/1904-electricite-solaire-l-9791029708916.html>
- InSunWeTrust. 2021. Panneaux solaires photovoltaïques – le guide complet. <https://www.insunwetrust.solar/prix-2021>
- Le Journal du photovoltaïque <https://www.journal-photovoltaïque.org/>
- Eurobaromètre 2020 <https://www.euroserv-er.org/>
- Hespul: <https://www.hespul.org/fr>

Les fiches techniques PRISME (Programme international de soutien à la maîtrise de l'énergie) sont publiées par l'IFDD.

Auteur :

Yves Maigne, Penelope Consult, yves.maigne@gmail.com

Directrice de la publication :

Cécile Martin-Phipps, Directrice, IFDD

Comité éditorial :

Ibrahima Dabo, Spécialiste de programme, IFDD
Boufeldja Benabdallah, Spécialiste de programme a.i., IFDD

Appui à l'édition et à la diffusion :

Louis-Noël Jail, Chargé de communication, IFDD
Marilyne Laurendeau, Assistante de communication, IFDD

Supervision technique :

Maryse Labriet, Eneris Consultants,
info@enerisconsultants.com

Édition et réalisation graphique :

Sudo, agence numérique

ISBN 978-2-89481-350-8

Après vingt ans passés dans l'industrie du photovoltaïque et son développement dans les pays du sud, Yves Maigne rejoint en tant que directeur, la Fondation Énergies pour le Monde dont il est aujourd'hui conseiller. Il participe à la réalisation de nombreux projets d'électrification rurale en Asie et en Afrique subsaharienne, associant étroitement l'ensemble des parties prenantes. Il a rédigé plusieurs ouvrages sur l'accès à l'électricité. Il est membre de l'académie française des technologies.



L'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF). Il est né en 1988 de la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, cette action a été élargie à l'environnement. Basé à Québec (Canada), l'Institut a aujourd'hui pour mission, notamment, de :

- contribuer au renforcement des capacités nationales et au développement de partenariats dans les domaines de l'énergie et de l'environnement,
- promouvoir l'approche développement durable dans l'espace francophone.

Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD)

200, chemin Sainte-Foy, bureau 1.40,
Québec, Québec, G1R 1T3, Canada
Téléphone : +1 418 692-5727
Télécopie : +1 418 692-5644
Courriel : ifdd@francophonie.org
Site Internet : www.ifdd.francophonie.org

Décembre 2021

Étude de cas. En agglomération lyonnaise (France), un toit solaire en fonctionnement depuis 11 ans

Description

M. et Mme Martin (nom fictif), attentifs à la question de l'environnement et des enjeux climatiques, cherchent, à leur niveau, à s'impliquer personnellement, alors qu'ils n'ont, ni l'un ni l'autre, de formation en électricité. Ils ne sont pas hostiles à ce que cet engagement financier soit assorti, à terme, d'un complément de revenus, aussi minime soit-il, sur une durée garantie de 20 ans.

En 2010, dès le lancement d'une politique incitative créant un crédit d'impôt à l'investissement et un tarif d'achat, ils décident, après s'être informés auprès de l'Agence de la transition énergétique (ADEME), de faire installer un générateur solaire intégré dans la toiture. La présence d'acteurs économiques lyonnais, dynamiques et compétents, dont leur installateur, a participé à cette décision.

Le générateur solaire de 2 250 W_c, connecté en octobre 2010, est composé de 10 modules photovoltaïques multicristallins.

Stratégie de mise en œuvre et financement

Les mécanismes de location de toitures n'étant pas encore développés au moment du projet, la stratégie suivie fut l'acquisition. L'investissement à la charge de M. et Mme Martin fut de 11 436 € toutes taxes comprises, avec une taxe sur la valeur ajoutée (TVA) à 5,5 %, corrélé à un crédit d'impôt de 6 364 €. La tarification, sur une période de 20 ans, est de 58 centimes d'euro par kWh, hors TVA.

Résultats

La production électrique a atteint 28 030 kWh soit, en moyenne, 2 550 kWh par an. Le bilan énergétique est conforme aux attentes

et à la moyenne de production d'un générateur solaire de 1 000 kWh/kW_c par an.

11 ans après le raccordement, le bilan est très positif.

- Aucune panne, aucun désagrément d'aucune sorte, que ce soit en termes de fourniture d'électricité, de qualité des composants ou d'étanchéité des joints modules solaires – toiture, n'est à déplorer.
- Le bilan financier est satisfaisant avec un revenu global de 16 257 € dont il faut soustraire annuellement 300 € de prime d'assurance et 60 € de frais de réseau. Le bénéfice net, à ce jour, s'élève donc à 7 237 € en tenant compte du crédit d'impôt mais sans intégrer de taux d'actualisation ni de TVA.
- Sur le plan environnemental, l'installation a permis d'éviter l'émission de près d'une tonne de CO₂/an, en se basant sur une quantité de CO₂ équivalent/kWh évitée de 37 g/an.
- Le temps de retour énergétique se situe à environ 2,6 années.

Conclusion

Le souci de l'environnement et un tarif d'achat avantageux, garanti sur 20 ans, mis en place par le gouvernement français pour promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables, ont convaincu une famille lyonnaise à s'équiper d'un toit solaire, dès 2010. Après 11 ans, les propriétaires de l'installation considèrent que l'opération est un succès technique, financier et environnemental.

Références

Informations obtenues auprès de la famille lyonnaise concernée. Pour en savoir plus, contacter l'auteur de la fiche.



Source : pxhere