



SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

25% de l'électricité mondiale bas carbone en 2050 !

—
RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE



A la veille de la COP21, l'heure n'est plus à questionner la réalité du dérèglement climatique mais bien à mettre en œuvre les solutions. De plus, aujourd'hui encore, près d'1,3 milliard d'êtres humains n'a pas accès à l'électricité.

Comment apporter les services énergétiques indispensables à ceux qui en sont dépourvus sans émissions de carbone ? Longtemps considérée comme trop chère et posant des problèmes techniques du fait de son intermittence, l'énergie solaire photovoltaïque a connu au cours des dernières années une évolution qui interpelle ce diagnostic.

Bien mieux, les progrès à venir permettent d'estimer qu'elle pourrait fournir au moins 25% de l'électricité mondiale en 2050¹ au lieu des 5% envisagés dans la plupart des scénarios prospectifs.



FONDATION
NICOLAS HULOT
POUR LA NATURE
ET L'HOMME

.....
¹ Sur une fourchette de consommation électrique totale en 2050 de 35 à 40 PWh (extrapolée à partir des scénarios du WEO 2014).

Le solaire photovoltaïque, une énergie de plus en plus compétitive

Alors que les premières découvertes concernant l'énergie solaire photovoltaïque datent du XXI^e siècle, cette source d'énergie est longtemps restée cantonnée au marché de niche du spatial. L'électricité produite à partir du photovoltaïque était, en effet, beaucoup plus chère que celle issue d'autres technologies (gaz, charbon, nucléaire).

Au début des années 2000, le LCOE (voir encadré) d'une installation photovoltaïque était d'environ 750 \$/MWh contre moins de 70 \$/MWh pour les autres types de production. Les subventions (en Europe notamment) et les progrès industriels et technologiques ont, ensuite, permis de développer le marché du photovoltaïque et amorcé une baisse continue des coûts, aujourd'hui du même ordre que ceux des moyens de production conventionnels.

Les évolutions techniques en cours et à venir détaillées dans cette étude permettent d'envisager une réduction de 20 à 40% du coût d'investissement initial d'une installation photovoltaïque d'ici 2030. A l'horizon 2050, le marché s'oriente vers une division par deux des coûts. Par ailleurs, nombre de constructeurs anticipent un allongement de la durée de vie des centrales photovoltaïques qui pourrait passer de 25 ans (durée actuellement prise en compte pour le calcul du LCOE) à 30 voire 40 ans.

Ces deux évolutions ne peuvent que profondément remanier le paysage électrique et énergétique par rapport à la vision actuelle. Le LCOE d'une installation photovoltaïque au sol pourrait se situer entre 50 et 35 \$/MWh en 2050, celui d'une installation résidentielle entre 70 et 50 \$/MWh.

Comparaison des LCOE du PV / nucléaire / gaz / charbon (\$/MWh)

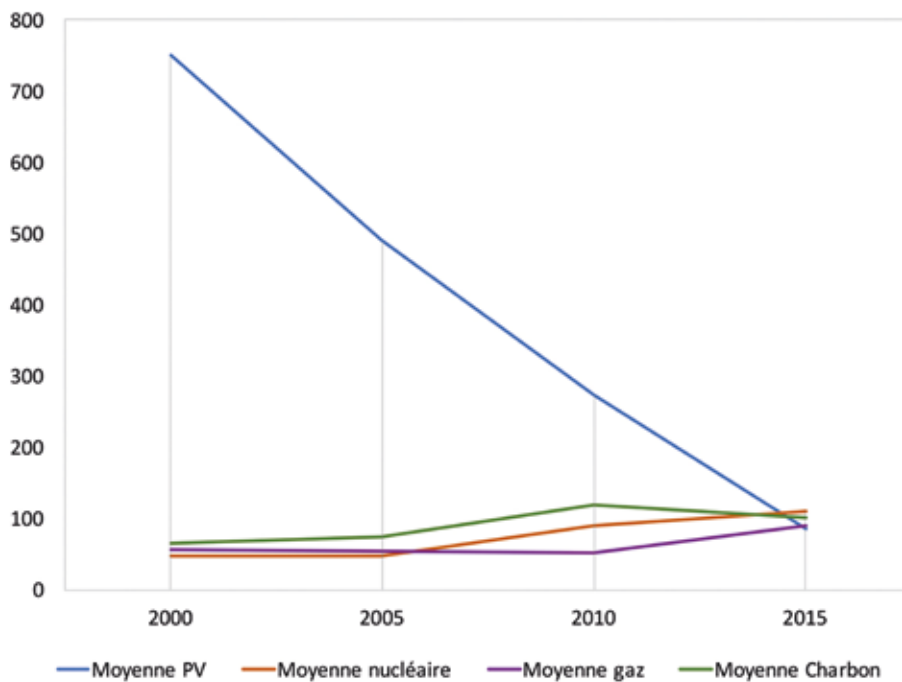


FIGURE 1 : COMPARAISON DU LCOE DU PV / NUCLÉAIRE / GAZ / CHARBON, INSTITUT FRAUNHOFER, DONNÉES TARIFS DE RACHAT DES INSTALLATIONS PV AU SOL EN FRANCE, LAZARD, TCDB (HORS COÛT DU CO₂), ETP AIE 2015. ILLUSTRATION : FONDATION NICOLAS HULOT.

EVOLUTION DES COÛTS DE CONSTRUCTION DE CENTRALES PV AU SOL (\$/KW)

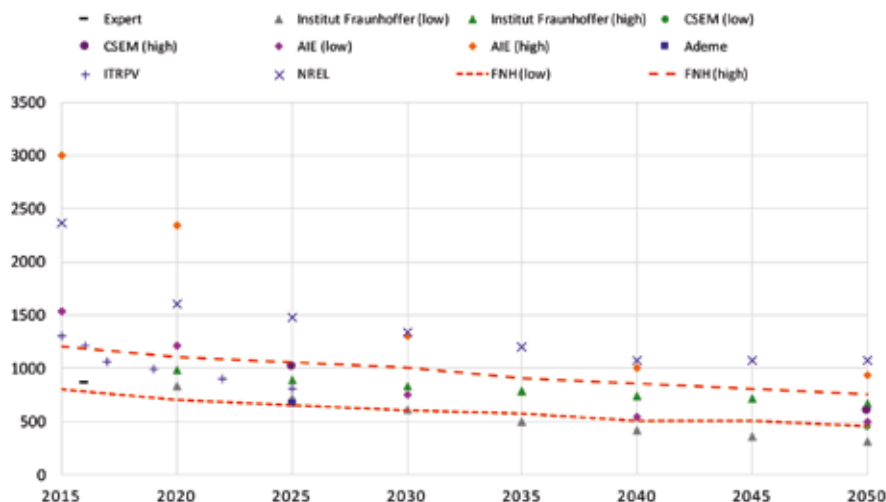


FIGURE 2 : PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES COÛTS D'INSTALLATION DE CENTRALES PV AU SOL, ILLUSTRATION : FONDATION NICOLAS HULOT.

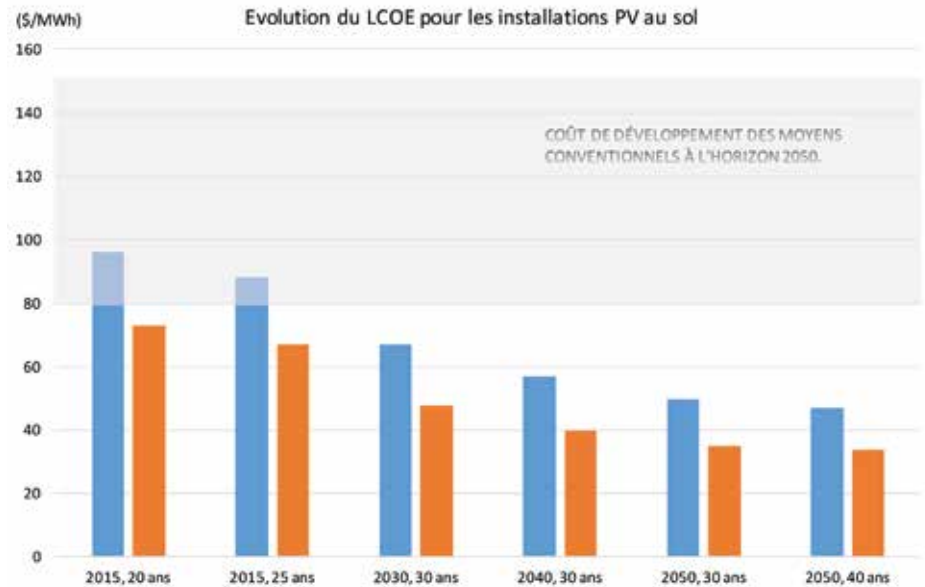
COÛT D'INVESTISSEMENT ET LCOE (Levelized Cost of Energy - Coût actualisé de l'énergie)

Deux données économiques permettent d'évaluer la compétitivité d'une installation de production d'énergie. Le coût de l'investissement initial, d'une part, est déterminant pour la décision de lancer le projet. Il est calculé en \$ par MW installé. Le LCOE, d'autre part, comprend non seulement l'amortissement du coût d'investissement initial mais aussi les coûts d'exploitation (maintenance, coût de l'énergie primaire) rapportés à l'ensemble des kWh produits sur la durée de vie de l'installation. Le LCOE (exprimé en \$/MWh) intègre un taux d'actualisation qui a la particularité de diminuer grandement les coûts futurs et se révèle ainsi défavorable à l'énergie solaire du fait de l'importance de l'investissement initial.

A l'inverse, les moyens de production conventionnels verront globalement leurs coûts croître. Ces technologies matures ne connaîtront aucune rupture dans les gains de compétitivité, tandis que certaines composantes du coût de ces installations augmenteront (exigences de sûreté pour le nucléaire, prise en compte d'un prix du carbone pour les centrales à gaz et au charbon, normes de réductions des émissions de particules pour le charbon et pressions croissantes de la société civile à l'encontre de l'extraction des fossiles).

LE PHOTOVOLTAÏQUE : UNE ÉNERGIE À PART !

La technologie photovoltaïque est basée sur des principes physiques totalement différents des autres moyens de production d'électricité. Ces derniers reposent en effet sur les lois de la physique classique, utilisant des mécanismes se produisant à une échelle macroscopique : entraîner un alternateur pour produire de l'électricité. La différence entre les technologies vient de la force utilisée pour faire tourner le rotor (vent, eau, vapeur issue de la combustion du charbon, du gaz ou des réactions de fissions nucléaires etc.). Le photovoltaïque est lui, fondé sur la physique quantique qui régit le comportement de la matière à l'échelle nanométrique et en-dessous. Or, cette physique n'a rien à voir avec celle que nous « expérimentons » tous les jours. Cela fait du photovoltaïque une énergie à part. Beaucoup plus modulaire que les autres (on peut fabriquer une installation d'1 W ou d'1 GW), elle peut encore bénéficier de ruptures technologiques visant à utiliser toujours moins de matériaux et des procédés de plus en plus rapides. Les autres moyens de production, fondés sur des technologies matures, ne peuvent connaître que des améliorations continues. Cette spécificité du photovoltaïque fait que cette industrie se rapproche beaucoup plus dans sa dynamique de développement des industries de l'électronique - qui connaissent des baisses de coûts exponentielles - de celles de l'énergie.



► FIGURE 3 : EVOLUTION DES FOURCHETTES DE LCOE POUR LES INSTALLATIONS AU SOL. SOURCES : FONDATION NICOLAS HULOT (SCÉNARIOS DE COÛTS D'INSTALLATION FIGURE 2, EN BLEU SCÉNARIO DE COÛT HAUT, EN ORANGE SCÉNARIO DE COÛT BAS), ADEME, EXPERTS, AIE, TRANSPARENT COST DATABASE, E&Y, BNEF, MIT, ILLUSTRATION FONDATION NICOLAS HULOT.



Le solaire photovoltaïque une énergie clairement soutenable au plan économique et environnemental.

La compétitivité du photovoltaïque étant assurée, il importe de vérifier que les investissements nécessaires pour rendre cette énergie significative dans le mix électrique sont envisageables. Notons tout d'abord que jamais une technologie du secteur de l'énergie n'a connu un tel développement qui se rapproche plus de celui propre au monde de l'électronique tant dans la rapidité de pénétration du marché que dans le rythme d'innovation. En 15 ans, la capacité installée a été multipliée par plus de 100 pour atteindre, fin 2014, 186 GW, dont plus de 40 GW installés rien qu'en 2014 (année record d'investissement à 136 Md\$). C'est l'ordre de grandeur de la capacité de centrales charbon installée annuellement en Chine (et environ 15-20% de la production équivalente d'électricité). Cette dynamique va par ailleurs en s'accroissant. Le simple maintien du niveau annuel d'investissement de 2014 conjugué aux baisses de coûts anticipées, conduisent à un cumul de 4 à 8000 GW installés d'ici 2050 (en tenant compte des installations à renouveler).

Ce scénario est vraiment conservateur puisqu'il revient à supposer l'arrêt de la croissance des investissements dans le

photovoltaïque malgré la hausse importante de sa compétitivité. Une fourchette de capacité de 6 à 8 000 GW permettrait de répondre à 20 - 25% de la demande mondiale d'électricité estimée en 2050¹. Au vu des éléments réunis dans la présente étude, cet objectif paraît aisément accessible en termes d'investissement et souhaitable au plan économique.

L'étude passe également en revue la littérature existante concernant la disponibilité des matières premières nécessaires pour un tel programme de centrales photovoltaïques et la question du taux de retour énergétique. D'après les données du MIT, le premier point ne semble pas poser de frein majeur pour les technologies reposant sur le silicium (second élément le plus abondant sur la planète). Quant au taux de retour énergétique, déjà satisfaisant, il est appelé à augmenter réduisant ainsi le contenu carbone de l'électricité photovoltaïque (entre 30 et 70 gr CO₂ par kWh actuellement). Cela place clairement cette source d'énergie dans le club des énergies suffisamment décarbonées² pour nous permettre de rester dans une trajectoire de réchauffement inférieure à 2°C.

1. 6000 à 8000 GwC représentent une production de l'ordre de 8 à 10 PWh (en considérant un ensoleillement moyen équivalent à 1350 kWh par kWc) sur une fourchette de consommation électrique totale en 2050 de 35 à 40 PWh (scenarios du WEO 2014).

2. A l'horizon 2050, nous devons viser un mix moyen de production d'électricité dont le contenu carbone est inférieur à 100 gr de CO₂ par kWh et aussi proche de 50 que possible.

L'intermittence, un frein majeur au développement du photovoltaïque ?

Le photovoltaïque ne produit que de jour et davantage en été qu'en hiver. Au niveau d'une installation, cette production peut varier d'une heure sur l'autre du fait des modifications de l'ensoleillement (passages nuageux par exemple). Cela peut générer des problèmes d'équilibre entre l'offre et la demande et donc au niveau de la gestion du réseau électrique. Afin d'éclairer cet enjeu, l'étude se penche sur les trois dimensions suivantes du système électrique.

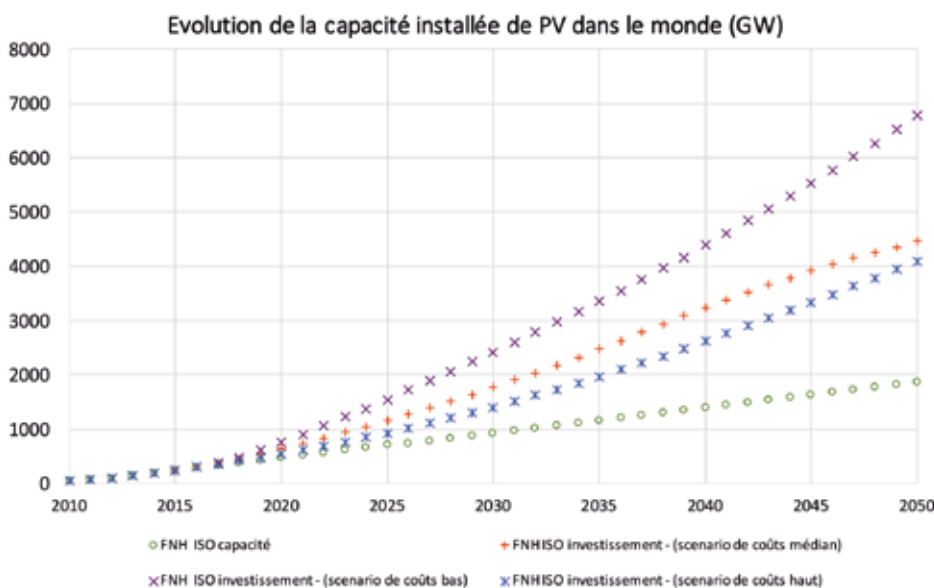
1. Quelle est la capacité d'un réseau mature à absorber l'intermittence ?

L'analyse du réseau français, typique d'un réseau mature et efficient, montre que les réseaux de transport actuels des pays développés (équipés pour gérer une variabilité significative de l'offre et de la demande) peuvent d'ores et déjà supporter un taux de pénétration du photovoltaïque de 20 à 25% de la puissance maximum appelée (soit dans le cas français 20 à 25 GW sur les 100 GW appelés lors de la pointe de consommation). Cela permettrait de fournir de 5 à 8% de la consommation finale totale sans mettre en place de dispositif nouveau. Au niveau des réseaux de distribution, l'adéquation entre la densité de consommation et la densité de production est en revanche une règle qu'il est important de respecter pour assurer un déploiement sans contrainte du photovoltaïque.

2. Peut-on rendre la consommation flexible pour suivre les variations de production ?

Le pilotage de la consommation (des individus ou des industriels), permet d'accroître encore le taux de pénétration du photovoltaïque dans le mix électrique. Cela consiste, par des procédés actuellement en cours de développement, soit à forcer la consommation de certains appareils électriques au moment des pics de production du photovoltaïque (en milieu de journée) soit à effacer la demande lors des creux de production (la nuit).

La plupart des techniques de pilotage de la consommation sont connues et pour certaines déjà mises en œuvre en France notamment (pilotage des ballons d'eau chaude et développement d'offres d'effacement). Elles ont de plus un potentiel de développement important qu'il s'agira d'augmenter en faisant évoluer les réglementations nationales pour les valoriser économiquement.



► FIGURE 4 : SCÉNARIOS DE DÉVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE : (I) CAPACITÉ ADDITIONNELLE ANNUELLE CONSTANTE (ÉGALE À CELLE DE 2014) (II) INVESTISSEMENT ANNUEL CONSTANT (ÉGAL AU NIVEAU DE 2014). CALCULS : FONDATION NICOLAS HULOT.



3. Comment améliorer le stockage de l'électricité ?

A ce jour, les moyens les plus économiques pour « stocker l'électricité » sont les stations de pompage hydraulique mais leur potentiel de développement est limité. Les récentes évolutions concernant le stockage électrochimique pourraient totalement bouleverser la problématique des moyens de lisser des productions intermittentes comme le photovoltaïque. En effet, longtemps considérée comme une technologie onéreuse, utilisable uniquement pour des usages spécifiques, le stockage électrochimique a connu au cours des 3-4 dernières années une rapide amélioration de sa compétitivité à l'image du photovoltaïque. Ainsi, des entreprises comme Tesla ou LG Chem affichent, en 2015, des coûts d'investissement de 300-350 \$ par kWh stocké (contre environ 1000 \$ par kWh stocké il y a 5 ans). Les perspectives d'évolution sont encore importantes.

Plusieurs rapports montrent qu'à un coût d'investissement inférieur à 200 \$ par kWh stocké, le stockage par batterie fournit une solution plus compétitive qu'un back-up par des moyens thermiques fossiles.

Le stockage électrochimique a, enfin, l'immense mérite de répondre aux premiers besoins des habitants dans les pays qui ne disposent pas de réseaux électriques structurés. Il s'agit, comme pour les téléphones portables qui ont permis d'éviter le développement d'infrastructures très coûteuses, d'une véritable opportunité historique.

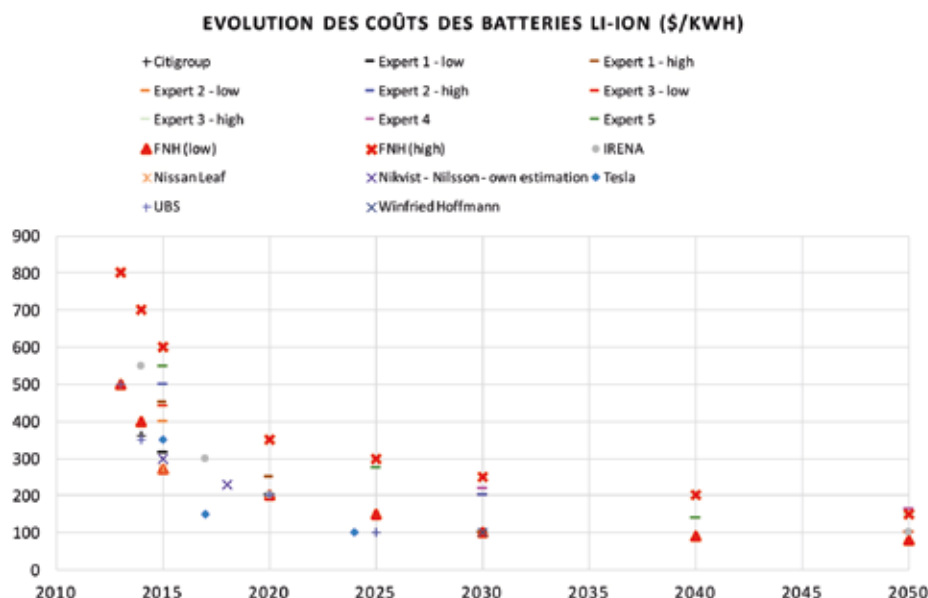
PILOTER LA CONSOMMATION C'EST CHANGER NOTRE FAÇON D'ENVISAGER L'ÉNERGIE !

Dans le monde du système électrique tel qu'il a été développé depuis la première centrale électrique d'Edison en 1882, la consommation est variable et la production s'ajuste. Avec le photovoltaïque c'est la production qui est variable. La consommation d'électricité peut-elle s'adapter à la production ? Oui, dans une certaine mesure : une partie des services apportés par l'électricité peuvent se satisfaire d'un décalage dans le temps de la fourniture d'électricité. Ainsi en va-t-il par exemple du besoin de laver son linge, de chauffer son eau sanitaire et son logement (s'il est bien isolé), ou de recharger son véhicule électrique. Il existe bien une flexibilité intrinsèque à l'utilisation des différents équipements et un réel intérêt à piloter la consommation.

POURQUOI Y A-T-IL UN DÉCALAGE ENTRE LE COÛT PERÇU DES BATTERIES ET CELUI RÉELLEMENT ATTEINT ?

Alors que le coût d'investissement constaté sur le marché tourne autour de 300-350 \$/kWh pour la technologie au lithium, les rapports 2015 de l'IRENA ou de l'AIE sur les technologies du stockage et les batteries, considèrent le coût d'investissement autour de 600-800 \$/kWh. Ce décalage s'explique par le fait que les fondamentaux électroniques des batteries leur confèrent une rapidité d'innovation supérieure au temps d'analyse du monde énergétique traditionnel. Tant que les batteries étaient chères, leur marché et leur impact restaient anecdotiques. L'amélioration continue et rapide des coûts de ces équipements entraîne une dynamique quasi on-off : elles peuvent passer très rapidement d'une absence de visibilité à un impact majeur sur le système électrique.

► FIGURE 5 : PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DU COÛT DES BATTERIES AU LITHIUM-ION. ILLUSTRATION : FONDATION NICOLAS HULOT.





Le tournant du photovoltaïque, un virage à ne pas manquer par les pouvoirs publics et les industriels !

Le développement technico-économique simultané des technologies du photovoltaïque, du pilotage de la consommation et du stockage électrochimique modifie les perspectives des systèmes électriques de demain. Un premier effet s'observe dès à présent avec le déploiement rapide d'équipements individuels de petites dimensions, et ailleurs, la réalisation de centrales de grande puissance commandées par des pays ensoleillés et riches. Cette tendance annonce des ruptures qui concerneront les systèmes électriques des pays développés. Les grands opérateurs et les gestionnaires de ces systèmes comme les pouvoirs publics doivent prendre la mesure de ces potentiels d'évolution, les accompagner plutôt que les ignorer ou, pire, les combattre. Qu'on le souhaite ou non, une partie des ménages, des acteurs économiques, des collectivités acquièrent ainsi une capacité et un intérêt à devenir leur propre producteur d'électricité. En permettant à chaque acteur de gérer une partie de ses besoins électriques (voire énergétiques avec le développement de la voiture électrique), les perspectives de développement du photovoltaïque modifient, en profondeur le lien entre consommateur et producteur d'électricité, lien aujourd'hui marqué par le rôle prépondérant du système électrique.

Ceux qui ne saisiront pas le virage assez tôt seront mal placés dans l'organisation énergétique de demain. De nombreux acteurs, y compris de grandes banques comme Goldman Sachs, Citigroup ou UBS,

ont pris conscience tant du potentiel de ces évolutions que du risque pour les entreprises ne les prenant pas en compte.

Plus grave, un scénario dans lequel le déploiement du photovoltaïque se réaliserait dans l'ignorance ou en simple contournement du système électrique centralisé actuel ne serait certainement pas optimal pour la société. A cet égard, les textes qui viendront compléter la loi de transition énergétique en France auront notamment la responsabilité de favoriser un tel déploiement dans le cadre d'une adaptation du système électrique national et européen. Les évolutions que cette étude entrevoit pour des horizons proches appellent donc un renforcement des politiques publiques concernant le déploiement du photovoltaïque, le pilotage des consommations, le stockage de l'électricité, les articulations tarifaires avec le réseau.

Un formidable espoir pour ceux qui n'ont pas encore accès à l'électricité à condition de l'envisager dans une perspective décentralisée au plus proche des besoins.

Plus largement, ces évolutions constituent une formidable opportunité pour les pays en voie de développement et, en particulier, les 20% de la population mondiale qui n'ont toujours pas accès à l'électricité, en leur permettant d'être maître de leur approvisionnement. Pour cela, il faut se rappeler que l'important n'est pas l'électricité en-soi, mais les services

qu'elle peut apporter : éclairage, accès au télécommunication (téléphones mobiles notamment qui sont un élément structurant de l'économie africaine, accès à la connaissance via internet), irrigation des cultures, conservation des aliments ou encore la santé (via des installations hospitalières pouvant opérer dans des conditions d'hygiène satisfaisantes, possédant des zones de froid et des installations de traitement des eaux usées) etc.

De tels services seraient apportés beaucoup plus rapidement et efficacement par des solutions innovantes fondées sur de petites installations photovoltaïques couplées à du stockage avec des secours thermiques facilement transportables. En effet, s'il faut plusieurs dizaines d'années pour construire un réseau électrique, quelques semaines suffisent pour installer un petit système fondé sur le photovoltaïque et le stockage.

Cette logique locale, avec une dynamique en tâche de léopard, c'est-à-dire de répartition uniforme sur le territoire, conduirait ensuite progressivement à une interconnexion mais pas forcément aussi poussée que dans le cas d'un système centralisé. Elle pourrait, surtout, être déployée à moindre coût, en impliquant les populations locales et en développant progressivement un tissu industriel notamment sur la gestion et la maintenance des installations. Enfin, cette électrification plus modulaire permettrait aux populations d'intégrer l'électricité et d'améliorer leur niveau de vie sans forcément modifier profondément leur façon de vivre. Elles auraient la possibilité d'adapter l'utilisation des énergies renouvelables à leur vision, ce qui n'est pas envisageable dans le cadre de plans de déploiement centralisés forcément grossiers dans la prise en compte des spécificités locales.

La collection « État des lieux et analyses »

La Fondation Nicolas Hulot réalise des études qui ont pour objet de dresser une synthèse de l'état des connaissances sur un sujet en abordant l'angle économique, social et écologique.

Etudes précédemment réalisées



► Agrocarburants
Cartographie des enjeux
en partenariat avec le Réseau
Action Climat (2008)



► Agriculture et gaz à effet de serre
en partenariat avec le Réseau
Action Climat (2010)



► L'énergie solaire photovoltaïque
(2011)



► Biodiversité et économie :
les clés pour comprendre
en partenariat avec Humanité
et Biodiversité (2012)



► Les solutions de mobilité durable
en milieu rural et périurbain
en partenariat avec le Réseau
Action Climat (2014)



► Mobilité au quotidien : comment
lutter contre la précarité
(2014)



► Démocratie participative :
guide des outils pour agir
2^{ème} édition (2015)

Novembre 2015

Coordination et Rédaction

Nicolas Ott – consultant indépendant

Comité de Pilotage

Marion Cohen (Fondation Nicolas Hulot)

Alain Grandjean (Economiste, Conseil scientifique de la Fondation Nicolas Hulot)

André-Jean Guérin (Conseil Economique, Social et Environnemental, administrateur de la Fondation Nicolas Hulot)

Merci à l'ensemble des experts consultés pour leur contribution et le temps consacré

Ch. Ballif, X. Barbaro, M. Brewster, A. Burtin, A. Chaperon, A. Cuomo, O. Daniélio, G. de Broglie, L. Deblois, I. Deprest, S. Dupré La Tour, N. Gauly, S. Lascaud, B. Lemaignan, D. Lincot, P. Malbranche, D. Marchal, A. Mine, O. Paquier, C. Philibert, Pedro A. Prieto, A. Roesch, JP. Roudil, E. Scotto, R. Sharma, P. Sidat, JM. Tarascon, G. Vermot Desroches.

LE CONTENU DU RAPPORT N'ENGAGE QUE LA FONDATION NICOLAS HULOT ET PAS LES PERSONNES INTERROGÉES.

Crédits photo : James Douglas/unsplash • Tatic • Gimball Prod • Anna Regelsberger CC BY-SA 3.0



FONDATION
NICOLAS HULOT
POUR LA NATURE
ET L'HOMME

Un démonstrateur de solutions

Créée en 1990, reconnue d'utilité publique, apolitique et non confessionnelle, la Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme œuvre pour un monde équitable et solidaire qui respecte la Nature et le bien-être de l'Homme. Elle s'est donné pour mission d'accélérer les changements de comportements individuels et collectifs en faisant émerger et en valorisant des solutions en faveur de la transition écologique de nos sociétés. Pour la Fondation, l'écologie ne doit plus être une thématique parmi d'autres mais constituer le cœur de l'action publique et privée.

Afin de mener à bien sa mission, la Fondation combine la réflexion, l'action et la sensibilisation.

Elle élabore des idées nouvelles et porte des propositions auprès des décideurs politiques et économiques, avec son Conseil scientifique et son réseau d'experts pluridisciplinaire de haut niveau.

Elle fait émerger et accompagne les acteurs du changement en soutenant et valorisant, en France comme à l'international, des initiatives porteuses d'avenir afin de les démultiplier à plus grande échelle. Cette réalité du terrain inspire et nourrit la production intellectuelle.

Et pour que chacun puisse être moteur de la transition écologique, elle élabore des outils et des campagnes de mobilisation citoyenne.

La Fondation est également une ONG environnementale représentative. A ce titre, elle siège dans plusieurs organismes consultatifs tels que le Conseil économique social et environnemental ou le Comité national de la transition écologique.

► www.fnh.org

*Partenaire fondateur
de la Fondation Nicolas Hulot*



Cette étude a été réalisée grâce au soutien de :

