

FILIÈRE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

# L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE



# L'ÉNERGIE DU SOLEIL



## QU'EST-CE QUE

## L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ?

C'EST LA LUMIÈRE DU SOLEIL RÉCUPÉRÉE ET TRANSFORMÉE DIRECTEMENT EN ÉLECTRICITÉ AU MOYEN DE PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES, AUSSI APPELÉS «MODULES».

La cellule photovoltaïque solaire, un dispositif utilisant l'effet photovoltaïque, permet de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Un système photovoltaïque consiste en un ensemble de cellules montées en panneaux qui sont reliés en série, en parallèle ou de façon combinée.

Il existe dans le monde diverses technologies photovoltaïques, qui ont atteint différents degrés de développement. Mis à part le photovoltaïque, plusieurs autres techniques sont utilisées pour produire de l'énergie solaire.



En couverture : Panneaux photovoltaïques au sol.

Ci-contre : Panneaux photovoltaïques sur le toit d'une maison.

## ÉTAT DE LA SITUATION

Le secteur photovoltaïque mondial a progressé considérablement depuis une décennie. Sa capacité de production est passée de 1 790 MW à 584 000 MW (IRENA, 2020) de 2001 à 2019; c'est près de 40 % d'augmentation en moyenne par année. Au début de 2020, la filière solaire photovoltaïque représentait environ 5,75 % de la production mondiale d'électricité renouvelable et 23 % de la puissance installée au titre des énergies renouvelables (IEA, 2020). Avec l'accroissement important des productions photovoltaïque et éolienne au cours des dernières années, la capacité de production d'électricité à partir d'une source renouvelable représente maintenant 28 % du bouquet électrique mondial.

Actuellement, les systèmes photovoltaïques raccordés à un réseau d'électricité occupent plus de 99 % du marché mondial de l'énergie solaire. Quant aux systèmes hors réseau, autrefois le type d'installation le plus répandu, ils représentent maintenant seulement 0,7 % du marché mondial.

Au Québec, la filière solaire photovoltaïque à production centralisée en est à l'étape de l'expérimentation. Hydro-Québec teste en Montérégie deux premières centrales solaires totalisant 9,5 MW (Hydro-Québec, s. d.). Quant à la production décentralisée, bien que peu répandue encore, elle existe bel et bien. Hydro-Québec expérimente différentes initiatives de production solaire photovoltaïque tant en réseau intégré qu'en réseau autonome.

## POTENTIEL SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie du Soleil est plus ou moins disponible, car l'ensoleillement est variable et parfois difficile à prévoir selon l'heure du jour, les conditions climatiques et la saison. L'insolation journalière change selon la région du Canada. Au Québec, la ressource est indisponible en période de pointe hivernale, soit les matins et les soirs. En conséquence, le système photovoltaïque doit être adapté à la grande variation d'ensoleillement entre l'hiver et l'été, particulièrement dans le nord du Québec.

Au Québec, l'intermittence de la ressource implique de multiples contraintes techniques dans le cas d'un système photovoltaïque raccordé au réseau d'électricité, surtout lorsque la capacité de production devient importante. Ultimement, ces contraintes influenceront, pour une question de prix, le choix d'un tel système.

Dans le sud du Québec, où se concentre la grande majorité de la population, le facteur d'utilisation annuel d'un système photovoltaïque avoisine les 16 % ou 17 %. Il est supérieur à celui de l'Allemagne ou du Japon, qui sont néanmoins les chefs de file du marché mondial de l'énergie solaire photovoltaïque.



Panneaux photovoltaïques au sol.

## RENDEMENT ET COÛTS

En 2020, le rendement des modules photovoltaïques utilisés pour les microréseaux atteint en moyenne 17 %. Celui des cellules multijonctions peut dépasser 45 % (NREL, 2020), mais le coût de fabrication de ces cellules est encore trop élevé pour un déploiement à grande échelle. Étant toutes plus ou moins sensibles à la température, les technologies photovoltaïques offrent un rendement et une puissance qui peuvent varier grandement, soit jusqu'à 30 %, entre l'été et l'hiver pour une même insolation.

Le principal frein à l'essor de la filière solaire photovoltaïque reste les coûts d'investissement. Au cours de la dernière décennie, ce secteur est né à coups d'incitatifs généreux, surtout pour le développement de systèmes raccordés à un réseau d'électricité. Ces dernières années, cependant, on a observé une importante baisse des coûts.

Au Québec, en 2020, le coût de l'électricité fournie par un petit système photovoltaïque raccordé au réseau est encore supérieur à celui de l'électricité éolienne ou de l'hydroélectricité produite dans la province. Mais, selon certaines projections de l'évolution des coûts de l'énergie (Canadian Energy Regulator, 2020), des autoproducteurs québécois d'énergie solaire paieraient leur électricité le même prix que les clients résidentiels d'Hydro-Québec au cours de la présente décennie.

**POUR EN SAVOIR D'AVANTAGE**

- Énergie du soleil
- Production d'énergie solaire
- Modes de production de l'énergie solaire
- Centrales et systèmes solaires photovoltaïques
- Enjeux de développement durable

**AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS**

- Système fiable, ayant une longue durée de vie (environ 30 ans).
- Peu d'entretien.
- Coût d'exploitation peu élevé.
- Grand potentiel de sites d'implantation (bâtiments, stationnements pare-soleil, espaces ouverts, etc.).
- Aucune pièce en mouvement.
- Système évolutif, qui permet d'augmenter la puissance installée au besoin.
- Dimensions et configurations variées des panneaux.
- Production parfois difficile à prévoir selon l'heure du jour, les conditions météorologiques et la saison de l'année.
- Système au sol requérant un grand espace.

**DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Les principaux enjeux pour les grands systèmes photovoltaïques au sol sont les suivants :

- Effet visuel : nombre de panneaux, dimension, couleur et brillance.
- Aucun impact sonore.
- Obstacle à l'écoulement des eaux pluviales et imperméabilisation partielle des sols (selon le type de fondation du système).
- Utilisation de quantités d'eau importantes, génération d'eaux usées, à des fins de refroidissement et de nettoyage.
- Augmentation des risques de dégradation du sol (ex. : érosion).
- Impact sur les habitats naturels, perturbation de la faune.
- Conflits possibles avec d'autres activités : terres agricoles, routes et chemins d'accès, espaces boisés et espaces bâtis (impact sur la valeur foncière).
- Utilisation d'éléments toxiques lors de la fabrication.
- Zéro émission de gaz à effet de serre et de contaminants atmosphériques lors de l'exploitation.
- Faible empreinte environnementale durant le cycle de vie.
- Étant donné que la majorité des panneaux solaires sont fabriqués en Chine, cette filière contribue peu à la création d'emplois locaux, du moins pour ce qui est de la production des panneaux.

# UNE RESSOURCE DURABLE

## Énergie du soleil

### Ensoleillement variable

L'ensoleillement varie de façon importante en fonction du temps, ce qui influe directement sur la production d'énergie solaire.

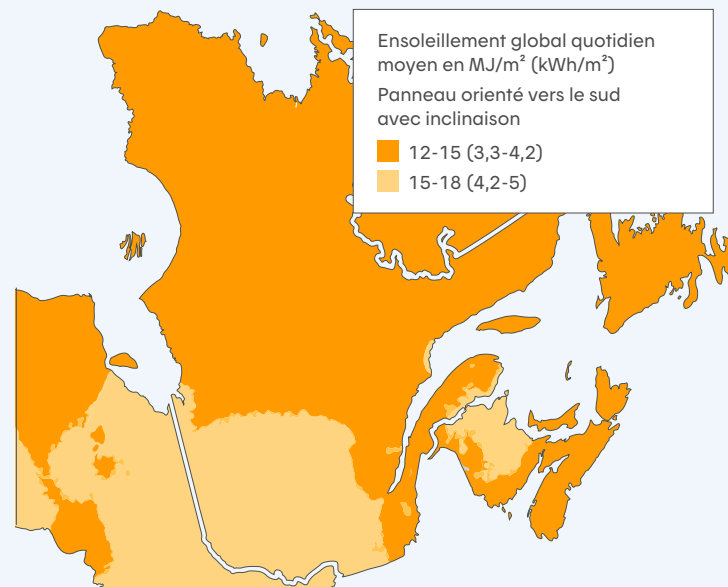
- **La variation selon le jour et la nuit est prévisible** : par une journée sans nuages, l'intensité de l'ensoleillement passe d'un maximum d'environ 1 000 W/m<sup>2</sup> vers midi à près de 0 W/m<sup>2</sup> aussitôt la nuit tombée.
- **La variation selon la couverture nuageuse est plus ou moins prévisible** : la présence de nuages diminue l'ensoleillement, ce qui réduit en conséquence la production d'énergie. Une diminution de production peut durer de quelques secondes (journées partiellement ensoleillées) à plusieurs jours (couverture nuageuse durable).
- **La variation selon la saison est prévisible** : l'intensité de l'ensoleillement journalier varie beaucoup selon les saisons sur toute la planète. Dans le sud du Québec, l'ensoleillement moyen journalier grimpe de 50 % entre décembre et juin, et encore plus dans les endroits plus au nord.

### Ensoleillement moyen au Québec

L'insolation correspond à la quantité de rayonnement solaire par unité de surface exposée au sol, exprimée en kWh/m<sup>2</sup>. En d'autres mots, il s'agit de la somme de tous les rayons du soleil (directs, indirects et diffus) qui parviennent à une surface d'un mètre carré. Cette donnée permet d'évaluer la valeur énergétique d'un lieu.

Au Québec, l'insolation journalière moyenne de la partie la plus habitée se situe entre 4,2 et 5 kWh/m<sup>2</sup> (voir la figure 1). C'est une valeur supérieure à celle de l'Allemagne et similaire à celle du Japon. Néanmoins, ces deux pays sont actuellement parmi les chefs de file du marché mondial de l'énergie solaire photovoltaïque avec la Chine et les États-Unis.

**FIGURE 1 - RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE L'INSOLATION\* JOURNALIÈRE MOYENNE AU QUÉBEC**



Source : Ressources naturelles Canada, 2013.

\* Insolation : quantité de rayonnement solaire direct, incident, par unité de surface horizontale exposée, à un niveau donné, exprimée en W/m<sup>2</sup>.

Sur une année, l'insolation moyenne varie de 1 000 kWh/m<sup>2</sup> à 1 350 kWh/m<sup>2</sup> au Québec, ce qui est comparable à ce qui est mesuré en Ontario, mais inférieur à ce qui est observé à Tokyo et dans le sud de la Californie (voir le tableau 1).

**TABLEAU 1 - INSOLATION ANNUELLE MOYENNE DE QUELQUES VILLES DU QUÉBEC ET D'AILLEURS DANS LE MONDE**

VILLE	INSOLATION MOYENNE ANNUELLE (kWh/m <sup>2</sup> )
Montréal	1 350
Québec	1 300
Sherbrooke	1 300
Sept-Îles	1 250
Fermont	1 100
Inukjuak	1 150
Toronto	1 400
Ottawa	1 350
Sud de la Californie	1 800
Tokyo	1 400
Bordeaux	1 350
Berlin	1 050

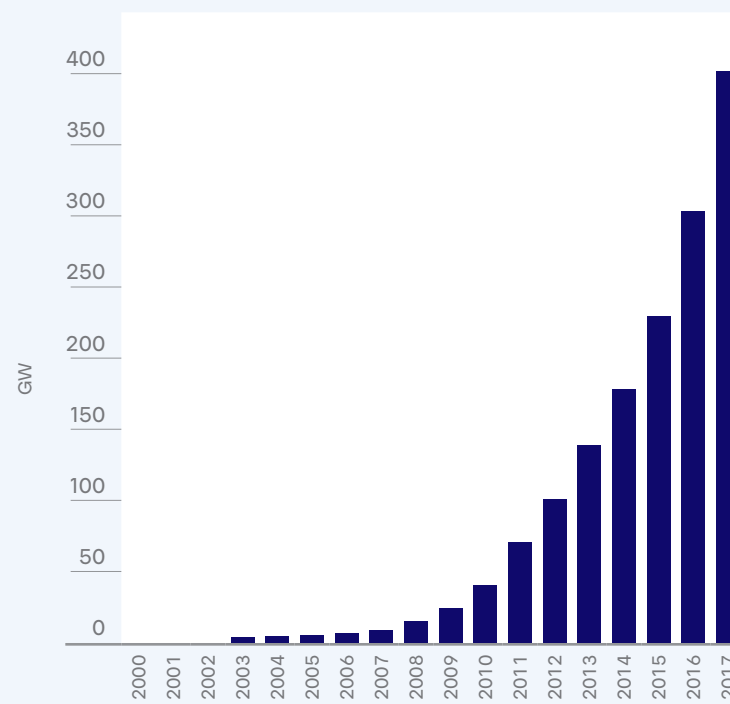
Source: [Global Solar Atlas](#), 2016 (en ligne).

## Production d'énergie solaire

### Dans le monde

À l'échelle mondiale, la production d'électricité issue de l'énergie solaire, aussi appelée *hélioélectricité* ou *énergie hélioélectrique*, progresse considérablement depuis une quinzaine d'années. Quoiqu'elle soit difficile à quantifier avec certitude, on estime que la puissance installée est passée de 1,8 GW à plus de 400 GW de 2001 à 2017, ce qui représente une augmentation moyenne de près de 38 % par année (voir la figure 2).

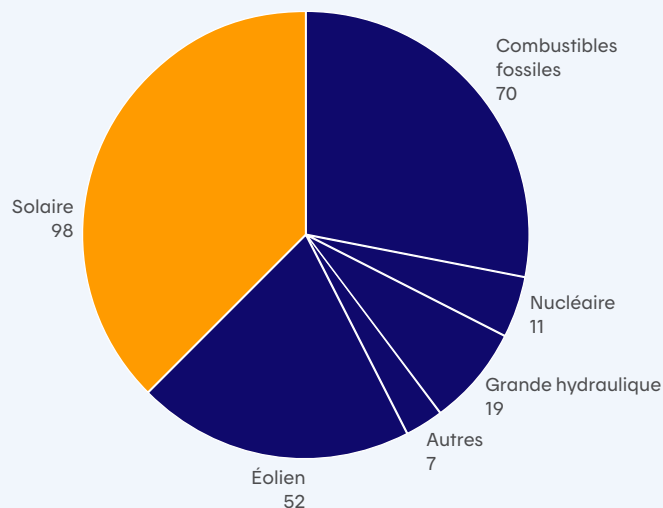
**FIGURE 2 - ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE SOLAIRE INSTALLÉE DANS LE MONDE (GW)**



Source: International Energy Agency, 2018. *Snapshot of Global Photovoltaic Markets*.

Dans l'ensemble des filières de production, l'énergie solaire est celle dont la puissance installée a connu la plus grande augmentation en 2017 : cette augmentation s'élève à 98 GW, alors qu'elle est de 52 GW pour l'énergie éolienne et de 70 GW pour l'énergie produite au moyen de combustibles fossiles (voir la figure 3). Ainsi, l'énergie solaire représentait à elle seule 38 % de la hausse de la puissance installée dans le monde en 2017. Cette croissance s'explique principalement par la contribution de la Chine, dont la puissance solaire mise en œuvre en 2017 représente près de 54 % de ce qui s'est ajouté à l'échelle de la planète.

**FIGURE 3 – CAPACITÉ DE PRODUCTION D'ÉNERGIE NETTE AJOUTÉE EN 2017 PAR FILIÈRE (GW)**



Source : Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF. 2018. *Global Trends in Renewable Energy Investment 2018*.

La filière de l'énergie solaire joue donc un rôle important dans le développement du secteur de l'électricité. Globalement, près de 500 TWh ont été produits en 2017 par des systèmes photovoltaïques installés et mis en service cette même année, ce qui représente plus de 2,1 % de la demande d'électricité de la planète. D'ailleurs, dans certains pays, la proportion d'électricité produite par la filière solaire atteint des pourcentages encore plus élevés : elle représentait environ 10,3 % de la demande d'électricité au Honduras, 8,7 % de celle de l'Italie, 7,6 % de celle de la Grèce, 7,0 % de celle de l'Allemagne et 5,7 % de celle du Japon.

Selon les données relatives à la puissance solaire installée au 31 décembre 2017<sup>1</sup>, la Chine arrive en tête avec 131 GW, suivie par les États-Unis (51 GW), le Japon (49 GW) et l'Allemagne (42 GW) (voir le tableau 2). Viennent après mais plus loin l'Italie (19,7 GW), l'Inde (18 GW) et le Royaume-Uni (13 GW). Pour tous les autres pays producteurs d'énergie solaire, cette puissance se situe sous la barre des 10 GW : 8,0 GW en France ; 7,2 GW en Australie ; 5,6 GW en Espagne et en Corée du Sud ; 2,9 GW au Canada, pour ne nommer que ceux-là. Les installations au Canada sont principalement concentrées en Ontario (99 %) en raison des politiques qui y ont été mises en œuvre ces dernières années.

1. Les données réelles de production peuvent varier en raison des différences d'irradiation entre les pays et des caractéristiques des centrales solaires photovoltaïques considérées.

**TABLEAU 2 – AJOUT DE PUISSANCE INSTALLÉE EN 2017  
ET PUISSANCE INSTALLÉE TOTALE AU 31 DÉCEMBRE 2017  
DES PAYS PRODUCTEURS D'ÉNERGIE SOLAIRE**

PAYS	AJOUT DE PUISSANCE INSTALLÉE (GW)	PUISSANCE INSTALLÉE TOTALE (GW)
Chine	53,00	131,00
Inde	9,10	18,00
États-Unis	7,40	51,00
Japon	7,00	49,00
Turquie	2,60	3,40
Allemagne	1,80	42,00
Australie	1,30	7,20
Corée du Sud	1,20	5,60
Bésil	0,99	1,10
Royaume-Uni	0,95	13,00
France	0,88	8,00
Pays-Bas	0,85	2,90
Chili	0,67	1,80
Italie	0,41	19,70
Belgique	0,28	3,80
Suisse	0,26	1,90
Thaïlande	0,22	2,70
Canada	0,21	2,90
Autriche	0,15	1,25
Mexique	0,15	0,54
Suède	0,09	0,30
Israël	0,06	1,10
Danemark	0,06	0,91
Portugal	0,06	0,58
Malaisie	0,05	0,39
Finlande	0,02	0,06
Espagne	0,15	5,60
Norvège	0,02	0,05
Afrique du Sud	0,01	1,80

## Au Québec

Bien que peu répandue, la production solaire décentralisée (particuliers et entreprises reliés à un réseau de distribution) existe bel et bien au Québec. En juin 2018, on comptait 515 auto-producteurs d'énergie solaire bénéficiant de l'option de mesurage net d'Hydro-Québec, ce qui n'inclut pas les producteurs non reliés (chalets ou réseaux autonomes).

Quant à la production classique à grande échelle (centrales solaires reliées au réseau de transport d'Hydro-Québec), elle prend forme progressivement. Dans le plan d'action de la politique énergétique du gouvernement du Québec, on prévoit la mise en œuvre d'un projet de développement solaire. Hydro-Québec pourra ainsi proposer un portefeuille de projets diversifiés qui seront fonction de l'évolution des besoins et qui tiendront compte du contexte énergétique.

## Modes de production de l'énergie solaire

### Utilisation de l'énergie solaire produite au moyen de panneaux photovoltaïques

- **Dispositif photovoltaïque autonome**: alimentation d'un système de faible puissance, notamment pour la signalisation optique, la recharge de batteries et l'alimentation de satellites.
- **Système solaire photovoltaïque installé sur un bâtiment, relié ou non à un réseau électrique**: alimentation de ce bâtiment. L'autoprodacteur peut satisfaire ses besoins d'énergie et vendre les surplus à un tiers.
- **Centrale solaire photovoltaïque raccordée à un réseau électrique**: alimentation de ce réseau en y injectant directement l'énergie produite par des centaines de modules photovoltaïques.



**Utilisation de l'énergie solaire passive :** l'orientation et le fenêtrage de l'habitation ainsi que l'installation de planchers offrant une masse thermique, de faux murs thermiques ou de fenêtres électrochromes permettent de maximiser l'apport de l'énergie calorifique provenant des rayons du soleil pour le chauffage et la climatisation.

**Utilisation de l'énergie solaire thermique :** un fluide caloporteur et des capteurs (à plans vitrés, à plans non vitrés ou à tubes sous vide) ou d'autres matériaux capables de capter le rayonnement solaire convertissent la lumière du soleil en chaleur. Parmi les applications classiques, il y a les chauffe-eau et les chauffe-piscines.

**Utilisation de l'énergie solaire thermodynamique :** un concentrateur, ou capteur solaire, focalise les rayons solaires directs au moyen de miroirs de diverses formes (plan, cylindre, antenne parabolique) pour chauffer un fluide jusqu'à une température élevée. Selon le niveau de concentration, la température peut atteindre de 350 °C à plus de 1 000 °C. La chaleur obtenue permet d'alimenter un générateur de vapeur pour produire de l'électricité. Ce mode de production d'énergie est la plupart du temps utilisé dans les régions désertiques.

## Centrales et systèmes solaires photovoltaïques

### Composantes

Une centrale solaire photovoltaïque est composée de deux sous-ensembles : l'équipement spécifique à la technologie photovoltaïque et l'équipement de base commun aux autres centrales de production électrique (voir la figure 4 page suivante).

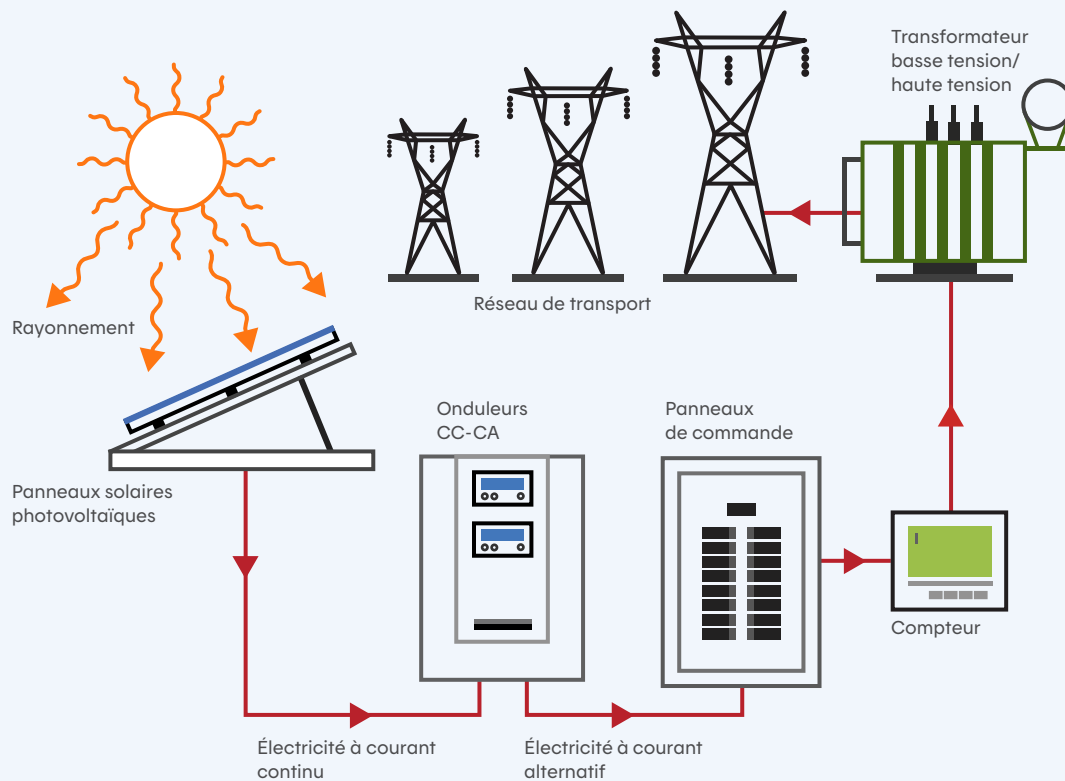
L'équipement propre à la technologie photovoltaïque comprend principalement les éléments suivants :

- Les panneaux solaires, qui sont composés de plusieurs dizaines de cellules photovoltaïques posées sur un support et recouvertes d'une vitre : ils convertissent le rayonnement solaire en électricité. Une centrale solaire est composée de nombreux panneaux interconnectés pour produire le niveau de tension requis selon les onduleurs sélectionnés.
- Les onduleurs : ils convertissent le courant continu (CC) produit par les panneaux en courant alternatif (CA) afin qu'il puisse être injecté dans le réseau.
- Les supports : ils supportent les panneaux. Les supports fixes maintiennent les panneaux à un angle fixe par rapport à l'horizon. Les supports pivotants permettent de modifier l'angle, soit de façon manuelle, soit de façon automatique au moyen d'un système mécanique de suivi de la position du soleil (est-ouest ou nord-sud).

L'équipement qu'on trouve habituellement dans les centrales électriques et qui est nécessaire à la production d'énergie solaire est :

- le réseau collecteur à basse tension et le poste, y compris un système de commande, de protection, de mesurage et de transformation de la basse tension en haute tension pour injection dans le réseau de transport.

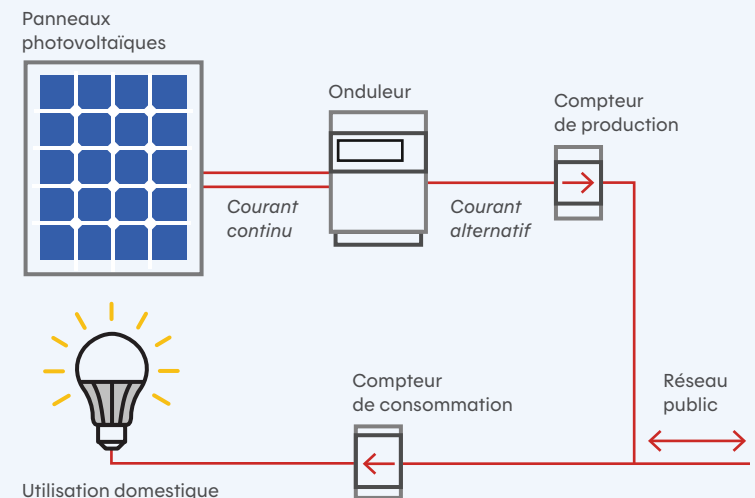
**FIGURE 4 - REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DES COMPOSANTES D'UNE CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE**



De plus petite envergure qu'une centrale, un système photovoltaïque domestique ou décentralisé consiste en un ensemble de cellules montées en panneaux qui sont reliés en série, en parallèle ou de façon combinée (voir la figure 5). Plus précisément, ce système est constitué :

- d'un ou de plusieurs panneaux photovoltaïques ;
- d'un onduleur qui convertit le courant continu (CC) produit par les panneaux en courant alternatif (CA) afin qu'il puisse être utilisé dans la résidence ;
- d'un compteur qui mesure la production et d'un autre qui mesure la consommation associée aux deux sources (réseau public et système décentralisé).

**FIGURE 5 - REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DES COMPOSANTES D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE DÉCENTRALISÉ**



### Types de cellules photovoltaïques

C'est la cellule photovoltaïque, un dispositif utilisant l'effet photovoltaïque (voir la figure 6), qui permet de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

Actuellement, il existe trois types de cellules photovoltaïques :

- **Cellules à base de silicium cristallin** : constituées de fines tranches de silicium monocristallin (un seul cristal), de silicium polycristallin (bloc de cristaux) ou d'un ruban de silicium. Leur fabrication requiert beaucoup de matières premières et d'énergie.
- **Cellules en couches minces** : composées de fines couches d'un matériau photosensible déposées sur un support en verre, en acier inoxydable ou en plastique. Les principaux matériaux utilisés sont le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CDTE), le diséléniure de cuivre et d'indium ou le

cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS). Leur fabrication requiert moins de matières premières et d'énergie. Les cellules faites de plusieurs couches minces, dites multijonctions, sont les plus efficaces.

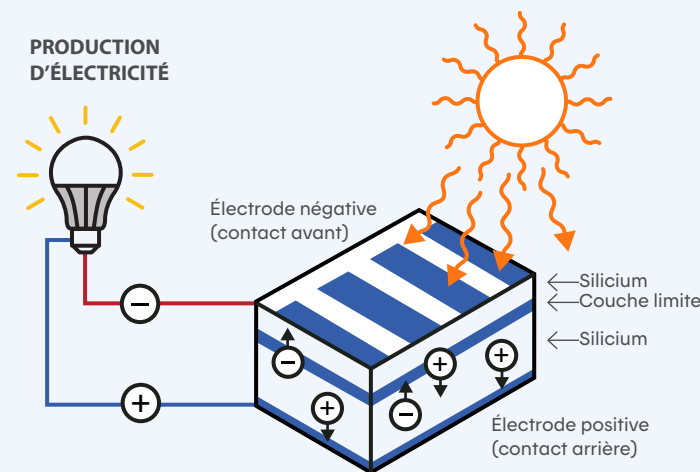
- **Cellules organiques** : constituées d'une fine couche d'un semiconducteur organique sur un plastique fin qui ressemble à une pellicule photographique flexible et légère. Il en existe actuellement trois types : celles à base de semiconducteurs organiques cristallins, celles à base de semiconducteurs organiques polymères et celles dites hybrides. Leur fabrication requiert un minimum de matières premières et d'énergie.

Les cellules à base de silicium cristallin (première génération) et les cellules en couches minces (deuxième génération) représentent la quasi-totalité des cellules commercialisées, mais les premières continuent de dominer le marché en raison de leur statut commercial, de leur efficacité relativement élevée et de leur faible coût. Les cellules à base de silicium représentaient environ 94 % de la production mondiale de cellules photovoltaïques en 2016 et 93 % en 2015. Au cours de la dernière décennie, le rendement moyen des panneaux solaires composés de cellules à base de silicium cristallin a augmenté d'environ 12 % pour atteindre de 17 % à 20 %. En laboratoire, de tels panneaux peuvent atteindre jusqu'à 24,4 % d'efficacité.

Parallèlement, l'offre de cellules en couches minces a connu une importante consolidation au cours des dernières années, et elle semble vouloir augmenter. En effet, ces cellules présentent certains avantages dans des conditions d'exploitation particulières et elles sont de plus en plus concurrentielles. Par conséquent, elles sont susceptibles de continuer à jouer un rôle important dans la gamme de produits offerts.

Les cellules photovoltaïques organiques (troisième génération) en sont encore au stade de la recherche et du développement. On estimait en 2017 que leur rendement atteignait environ 12 %.

FIGURE 6 - L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE



L'effet photovoltaïque est la conversion directe de photons lumineux en courant électrique par l'intermédiaire d'un matériau semiconducteur.

En cours de développement, les cellules hybrides à pérovskites sont considérées comme très prometteuses. S'apparentant aux cellules en couches minces, elles sont constituées d'iodure de plomb et de méthylammonium. Des rendements de l'ordre de 22 % ont été atteints en laboratoire.

Le rendement des cellules multijonctions dépasse 40 %, mais leur coût de fabrication est encore trop élevé pour qu'elles soient fabriquées et offertes à grande échelle. Elles peuvent toutefois être utilisées avec un **concentrateur optique**. Celui-ci fait appel à une lentille ou à des miroirs pour focaliser la lumière du soleil sur les cellules, qui sont placées à l'intérieur d'un collecteur. On peut ainsi produire autant d'électricité avec un plus petit nombre de cellules.

Enfin, il est à noter que toutes les cellules photovoltaïques commercialisées sont plus efficaces lorsqu'il fait froid. Ainsi, à ensoleillement égal, un système solaire photovoltaïque peut être jusqu'à 30 % plus efficace l'hiver que l'été.

## Réseau

Les systèmes photovoltaïques sont raccordés ou non à un réseau d'électricité.

### Systèmes raccordés à un réseau d'électricité

- Système relié à un bâtiment utilisant de l'électricité.
- Système intégré à une structure qui est raccordée à un système ou à un réseau d'électricité (ex. : toit d'un passage public, mur antibruit).
- Système constitué d'un ensemble de cellules montées en panneaux qui sont reliés en série, en parallèle ou de façon combinée au sol. Il peut couvrir une superficie de milliers ou de dizaines de milliers de mètres carrés. Ce système de production alimente un réseau d'électricité.

### Systèmes hors réseau

- Satellites artificiels, appareils portables, petits accessoires comme les calculatrices et les montres, feux et panneaux de signalisation, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, sites isolés (électrification).

### Facteur d'utilisation et profil de production

Le facteur d'utilisation d'une installation photovoltaïque correspond au rapport entre l'énergie électrique que celle-ci produit pendant un an et l'énergie qui aurait été produite si cette installation avait fonctionné à sa puissance maximale en continu. Ce facteur varie d'une région à l'autre selon la quantité de rayonnement solaire; par exemple, il est d'environ 15 % au Canada et de 25 % à 30 % dans les régions les plus ensoleillées des États-Unis.

Le profil de production présente généralement une période de pointe quotidienne en milieu de journée et une augmentation des quantités d'énergie mensuelles en été. Au Québec, la complémentarité de la production d'énergie solaire avec le profil de charge n'est pas très bonne, contrairement à ce qui est observé en Californie, par exemple.

### Performance

La performance des systèmes photovoltaïques dépend surtout de l'insolation (c.-à-d. la quantité de rayonnement solaire disponible au sol) et de l'efficacité de conversion de la technologie utilisée.

L'insolation est principalement modifiée par la position du soleil (distance et inclinaison) et par la couverture nuageuse, ou *nébulosité*, qui varie selon les saisons. La capacité réfléchissante, appelée aussi *réflectivité* ou *albédo*, de la surface environnante influe également sur l'insolation. Plus cette capacité est élevée, plus la quantité de rayons solaires indirects captés par les panneaux photovoltaïques s'accroît. À titre d'exemple, la réflectivité de la neige est parmi les plus élevées.

La performance d'un système photovoltaïque dépend aussi des conditions atmosphériques, telles que la température, l'humidité, les précipitations et le niveau de pollution. À ensoleillement égal, un système est plus performant par temps froid (basse température ambiante, vent ou système de refroidissement) que par temps chaud. Ainsi, une diminution de la température de 10 °C se traduit par une augmentation de la production d'énergie de 3 % à 7 %.

Pour des conditions atmosphériques et environnementales données, la performance d'une installation varie donc en fonction des caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques et de leur inclinaison par rapport au sol.

## Évolution des coûts

### Panneaux solaires

Depuis 1990, le coût moyen des panneaux solaires photovoltaïques baisse continuellement, à l'exception d'une courte période au début des années 2000. La hausse des coûts de 2004 à 2008 s'explique par une pénurie de silicium cristallin dans le monde. Celui-ci a été remplacé par un silicium développé spécialement pour la filière de l'énergie solaire. De 2009 à 2017, la production de modules photovoltaïques a continué d'augmenter, et leur coût n'a pas cessé de diminuer.

De 2010 à 2016, le coût des modules a baissé d'environ 80 %. En 2016, leur prix de vente moyen en Chine s'établissait à 0,43 \$ US/W, mais ce coût devenait parmi les plus élevés en Californie, s'élevant à 0,61 \$ US/W. En 2017, les prix ont encore légèrement chuté : on pouvait fabriquer de façon durable des modules de bonne qualité pour 0,40 \$ US/W ou moins. Ensemble, la Chine et le Japon représentaient environ 70 % de la production mondiale de modules en 2015 et en 2016.

### Systèmes photovoltaïques à production classique

De 2010 à 2017, selon le coût moyen pondéré des composantes, les coûts totaux pour l'installation d'un système photovoltaïque à grande échelle ont diminué de 68 %, avec une baisse de 10 % en 2017 par rapport à 2016.

La baisse rapide des coûts en Chine, au Japon et aux États-Unis est le principal moteur de la compétitivité croissante de la filière de l'énergie solaire. Au cours de la période allant de 2010 à 2017, la réduction des coûts totaux pour l'installation d'une centrale photovoltaïque a dépassé 70 % dans de nombreux pays. Ce sont les États-Unis qui ont connu la plus petite baisse (52 %) au cours de cette période.

Ainsi, en 2016, le prix des systèmes photovoltaïques à grande échelle en fonction de la puissance crête (kWc) atteignait environ 660 \$ US/kWc en Allemagne, 1 005 \$ US/kWc en Chine et 1 500 \$ US/kWc aux États-Unis et au Canada.

Les prix des systèmes ont continué de diminuer en 2016 et en 2017 en raison d'une baisse des prix des modules, des coûts accessoires et des coûts marginaux. Des prix inférieurs à 1 000 \$ US/kWc pour les systèmes photovoltaïques à grande échelle sont désormais courants dans les appels d'offres très concurrentiels.

### Systèmes photovoltaïques pour la production décentralisée (marché résidentiel)

Les coûts totaux d'installation d'un système photovoltaïque destiné à une résidence ont également fortement diminué dans un grand nombre de pays depuis 2010. En Allemagne, au Japon et aux États-Unis, ces coûts oscillaient entre 6 700 \$ US/kW et 11 100 \$ US/kW en 2007. Une décennie plus tard, cette fourchette se situait entre 1 050 \$ US/kW et 4 550 \$ US/kW, ce qui correspond à une baisse de 47 % à 78 %. La Californie demeure l'endroit où ces coûts sont les plus élevés : au premier trimestre de 2017, ils s'élevaient à 4 550 \$ US/kW, ce qui est deux fois plus qu'en Allemagne et trois fois plus qu'en Inde.

### Qu'en est-il au Québec ?

En 2018, l'installation d'un système photovoltaïque pour une résidence coûtait entre 2 500 \$ CA/kW et 3 250 \$ CA/kW, soit environ 3 000 \$ CA/kW en moyenne.

En décembre de la même année, l'Office national de l'énergie (ONE) a publié un rapport portant sur la viabilité financière des projets d'énergie solaire typiques du Canada intitulé [Rentabilité de l'énergie au Canada](#).

La compétitivité de la production d'énergie solaire dans une province dépend généralement plus du prix de l'électricité que du taux d'ensoleillement à cet endroit.

Dans son rapport, l'ONE présente le rendement moyen d'un système solaire résidentiel en tenant compte du coût de l'électricité dans les provinces et territoires canadiens selon trois scénarios : aujourd'hui (2018), dans un proche avenir (2023) et dans un avenir à coûts faibles (2028). Ces scénarios reposent sur le fait que les coûts d'installation des systèmes solaires diminuent au fil du temps, une tendance qui devrait se poursuivre encore quelques années. Par conséquent, le seuil de rentabilité – c'est-à-dire le montant des économies d'électricité à réaliser pour que le propriétaire du système recouvre tous ses coûts – continuera aussi de baisser.

**Malgré tout, les systèmes solaires résidentiels ne sont pas rentables au Québec et au Manitoba notamment en raison du faible prix de l'électricité, et ce, même avec un avenir à coûts faibles (2028).**

Cependant, le choix d'installer un système résidentiel, commercial ou communautaire n'est pas toujours seulement motivé par les économies d'argent que celui-ci peut générer. D'autres facteurs peuvent entrer en jeu, notamment ceux relatifs à l'environnement. Dans un tel contexte, le seuil de rentabilité du système serait inférieur à ceux indiqués dans le rapport de l'ONE, mais cette valeur ne constituerait peut-être pas un bon indicateur des économies réalisées par le propriétaire.

## Enjeux de développement durable

Voici les principaux enjeux environnementaux associés à la filière de l'énergie solaire.

### Émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre et de contaminants atmosphériques sont associées à la fabrication et à l'installation des panneaux solaires. En effet, les systèmes photovoltaïques ne génèrent pas d'émissions de GES lorsqu'ils fonctionnent normalement. Celles qui sont attribuables à la fabrication des systèmes dépendent majoritairement de la source d'énergie utilisée dans la région où sont fabriquées leurs composantes. Il en est de même pour les émissions de GES qui sont dues à l'installation des systèmes : elles varient en fonction de l'équipement ayant servi à cette étape.

### Analyse du cycle de vie

Selon [l'approche du cycle de vie](#), les principaux impacts environnementaux de la filière solaire seraient légèrement supérieurs à ceux de la filière hydraulique et des autres filières de sources renouvelables. La durée de vie des systèmes, les conditions d'ensoleillement et la fabrication des panneaux dans des pays où une part importante de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles sont les éléments qui comptent le plus dans l'analyse du cycle de vie de la filière solaire.

Pour avoir plus d'information sur le sujet, on peut consulter les rapports suivants :

- [Rapport sur la comparaison des filières et bouquets électriques](#) ;
- [Analyse du cycle de vie des filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle](#).

### Écosystèmes et biodiversité

L'installation d'un système ou d'une centrale photovoltaïque au sol peut avoir des impacts sur le milieu naturel : érosion, légère modification de la couverture végétale, fragmentation du territoire pour certaines espèces, etc. Dans les zones arides, l'installation de panneaux solaires peut nécessiter une modification importante du paysage, comprenant l'enlèvement de la végétation, le nivellement et le compactage du sol ainsi que la construction de routes d'accès qui augmentent la perte de sol causée par le vent et l'eau.

Les centrales photovoltaïques intégrées dans les milieux bâtis ont généralement peu d'impacts directs sur la biodiversité. Le principal impact touche la faune, en particulier celle qui est obligée de se déplacer en raison de la pose d'une clôture autour d'un terrain couvrant parfois une importante superficie. Pour les grands projets, on devrait prévoir des ouvertures et des corridors pour faciliter le passage des animaux. La présence de systèmes photovoltaïques dans les régions arides s'accompagne de certains effets bénéfiques, dont la création de zones ombragées pour la petite faune, la limitation de la population d'espèces envahissantes et la diminution des perturbations causées par les véhicules circulant hors route.

Comme toutes les installations industrielles, les systèmes et centrales solaires peuvent avoir un impact sur la faune ailée. La mortalité des oiseaux causée par la présence d'équipements photovoltaïques serait très limitée et beaucoup plus faible que celle causée par la présence d'autres types d'infrastructures.

Ainsi, pour les panneaux photovoltaïques, la mortalité est liée aux collisions résultant du contact direct de l'oiseau avec les constructions. Pour les centrales thermodynamiques situées dans des zones désertiques, la mortalité est liée aux brûlures à la suite de l'exposition à la lumière solaire concentrée. En Californie, selon l'une des rares études sur le sujet, on estime que la mortalité aviaire est d'environ 10 décès par MW installé par an, ce qui est nettement inférieur à ce qui est observé pour les autres infrastructures (bâtiments, centrales thermiques, etc.). Dans cette étude, les mortalités aviaires se situaient dans la fourchette basse des mortalités estimées pour les installations d'énergie éolienne à grande échelle.

L'hypothèse selon laquelle les oiseaux aquatiques pourraient confondre les modules solaires et les plans d'eau serait non fondée. Une étude menée en Allemagne dans un parc solaire adjacent à un immense bassin de retenue du canal Rhin-Main-Danube n'a pas été concluante à cet égard.

La consommation d'eau associée au fonctionnement normal d'un système photovoltaïque est minime, soit 15 l/MWh. Elle est toutefois plus importante lors du nettoyage des panneaux solaires dans les régions désertiques, où la poussière peut diminuer l'efficacité de ceux-ci. Ce type de nettoyage n'est pas nécessaire au Canada. Les besoins en eau de la filière solaire sont bien moindres que ceux de la filière thermique utilisant le charbon (1 140 l/MWh) et de la filière nucléaire (1 500 l/MWh), pour lesquelles l'eau est indispensable aux processus de refroidissement. Pour ce qui est des centrales solaires thermodynamiques, la consommation d'eau peut être plus élevée que celle d'une centrale au charbon ou au gaz si le système de refroidissement utilise de l'eau plutôt que de fonctionner à sec. Cette technologie n'est pas utilisée au Canada.

### Santé et qualité de vie

La toxicité de certains composés chimiques entrant dans la fabrication d'un système photovoltaïque, comme le tellure de cadmium, suscite des préoccupations. Toutefois, ces composés sont utilisés en faible quantité lors de la fabrication et ne sont pas rejetés dans l'atmosphère pendant l'exploitation. Aux États-Unis, les émissions de cadmium associées à l'énergie solaire sont 150 fois plus faibles que celles associées à l'énergie thermique au charbon. Par ailleurs, une fois les cellules photovoltaïques rendues à la fin de leur vie utile, les métaux peuvent être recyclés. Par contre, il existe à ce jour peu de sites de récupération prévus à cet effet.

Dans les régions non électrifiées, l'utilisation de l'énergie solaire améliore la qualité de vie. Par exemple, elle assure l'éclairage ou permet l'accès à l'information (radio, télévision et téléphonie cellulaire), ce qui peut contribuer à l'alphabétisation. De plus, l'utilisation d'appareils fonctionnant à l'énergie solaire (ex.: cuisinières) est bénéfique pour la santé, contrairement à l'usage du bois et des produits pétroliers à l'intérieur des maisons, qui génère des émissions de contaminants atmosphériques.

### Aménagement du territoire

Une centrale solaire photovoltaïque occupe plus d'espace au sol qu'un parc éolien, mais elle a un impact visuel moindre. En effet :

- sa structure horizontale atteint quelques mètres de hauteur, ce qui la rend peu visible même pour un observateur se trouvant à proximité ;
- elle présente une gamme de couleurs passe-partout – entre le bleu moyen et le gris foncé ;
- elle est généralement immobile ou peu mobile (systèmes avec suiveurs) – elle a peu de pièces en mouvement qui pourraient attirer l'attention ou n'en a aucune.

L'espace nécessaire au sol pour l'installation de panneaux solaires est de 2 à 3 ha environ par mégawatt en courant continu si les supports sont fixes, et le double si les supports ont un axe de rotation (respectivement environ 6 et 12 acres par mégawatt en courant continu). En termes d'efficacité de l'utilisation des terres, les systèmes solaires photovoltaïques génèrent la plus grande quantité d'énergie par unité de surface parmi les sources renouvelables, y compris l'éolien, l'hydraulique et la biomasse.

Fait à souligner, une centrale solaire photovoltaïque ne prend pas plus d'espace au sol qu'une centrale au charbon des États-Unis. En effet, au cours de la durée de vie d'une centrale au charbon (25 ans), les activités de production et de transport nécessitent beaucoup d'espace, notamment parce que 70 % du charbon utilisé dans les centrales thermiques aux États-Unis est extrait en surface. Un système photovoltaïque intégré à un bâtiment peut avoir un impact sur le paysage, mais dans une moindre mesure qu'un système au sol. Lorsque les panneaux solaires sont placés sur un toit, le système a l'avantage de n'utiliser aucune parcelle de terrain.

Aux États-Unis et dans d'autres pays où les terres sont limitées, la combinaison du solaire avec d'autres sources d'énergie (p. ex., l'eau, le vent, la biomasse, les combustibles) peut s'avérer avantageuse. Des méthodes d'optimisation de systèmes faisant appel à la fois à l'énergie solaire et à l'énergie éolienne sont actuellement mises en œuvre dans diverses régions du monde.

Les systèmes photovoltaïques pouvant être placés dans toutes sortes d'endroits (terrains vagues, friches industrielles, abords d'infrastructures routières, ferroviaires ou aéroportuaires, plans d'eau, etc.), il pourrait y avoir des conflits d'usage entre les agriculteurs et les producteurs d'énergie solaire. Cela dit, l'exploitation d'un système solaire photovoltaïque est compatible avec certaines activités agricoles, comme l'élevage d'ovins, l'apiculture et les petites cultures maraîchères.



Ainsi, depuis 2015, plus de cent centrales photovoltaïques flottantes ont été mises en service dans le monde entier sur des réservoirs hydroélectriques, des plans d'eau d'entreprises industrielles, des étangs d'aquaculture, etc. Les avantages de l'installation de modules solaires sur les masses d'eau comprennent une production économique accrue par unité de terre, une production améliorée (due probablement à l'effet de refroidissement de l'eau sur les panneaux solaires) et une évaporation réduite de l'eau. Le Japon se classe en tête du nombre de centrales flottantes en raison de l'espace limité au sol pour les systèmes photovoltaïques solaires. D'autres pays se démarquent : la Chine, avec une puissance installée d'environ 400 MW, la Corée et le Brésil, où le premier projet de centrale solaire flottante du pays a été achevé en 2017.

### Économie régionale

Le développement de la filière solaire requiert des investissements importants, mais il peut générer des emplois et des retombées économiques locales lors de la construction, de l'exploitation et du démantèlement de l'équipement. L'existence de cette filière, qui sert à assurer l'approvisionnement en électricité, peut favoriser le développement régional ou renforcer la sécurité énergétique. L'énergie supplémentaire vendue à un tiers ou à un distributeur local peut représenter une nouvelle source de revenus. Les retombées économiques locales sont maximisées si le propriétaire et l'entrepreneur sont issus du milieu d'accueil, si les composantes du système photovoltaïque y sont fabriquées et si l'entretien de l'équipement, minimal et facile, est confié à des personnes de l'endroit. À noter : le nombre d'emplois créés par mégawattheure produit est deux fois plus élevé pour la filière solaire que pour la filière thermique.

### Acceptabilité sociale

De façon générale, la filière de l'énergie solaire est bien acceptée par les communautés d'accueil. En bref, les impacts environnementaux sur le paysage et sur la faune, lorsque bien gérés, sont limités. Or cette filière est encore peu présente au Québec. Certaines mesures pourraient contribuer à son évolution, notamment une meilleure connaissance des impacts potentiels des divers panneaux photovoltaïques offerts sur le marché.



## RÉFÉRENCES

1. Agence internationale de l'Énergie (AIE). 2019. [Renewables 2019: Analysis and forecast 2024](https://doi.org/10.1787/b3911209-en). (En ligne). Paris, AIE. <https://doi.org/10.1787/b3911209-en>. Site consulté le 4 décembre 2020.
2. Distributed Wind Energy Association (DWEA). s. d. [Briefing Paper: Birds / Avian Mortality](http://distributedwind.org/assets/docs/PandZDocs/birds-one-pager-v.2-submitted-07-12-11.pdf). (En ligne). <http://distributedwind.org/assets/docs/PandZDocs/birds-one-pager-v.2-submitted-07-12-11.pdf>. Document consulté le 7 août 2015.
3. Distributed Wind Energy Association (DWEA). s. d. [Briefing Paper: Tower Setback](http://distributedwind.org/assets/docs/PandZDocs/dwea-setback.pdf). (En ligne). <http://distributedwind.org/assets/docs/PandZDocs/dwea-setback.pdf>. Document consulté le 7 août 2015.
4. Distributed Wind Energy Association (DWEA). s. d. [Briefing Paper: Unique Benefits of Distributed Wind](http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2012/08/Unique-Benefits-of-DW.pdf). (En ligne). <http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2012/08/Unique-Benefits-of-DW.pdf>. Document consulté le 7 août 2015.
5. Distributed Wind Energy Association (DWEA). 2015. [DWEA Distributed Wind Vision - 2015-2030](http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2012/08/DWEA-Distributed-Wind-Vision.pdf). (En ligne). <http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2012/08/DWEA-Distributed-Wind-Vision.pdf>. Document consulté le 3 août 2015.
6. Distributed Wind Energy Association (DWEA). 2014. [DWEA Briefing Paper: Property Values](http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2014/05/DWEA_Property_Values.pdf). (En ligne). [http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2014/05/DWEA\\_Property\\_Values.pdf](http://distributedwind.org/wp-content/uploads/2014/05/DWEA_Property_Values.pdf). Document consulté le 7 août 2015.
7. Global Wind Energy Council. 2014. [Global Wind Energy Outlook 2014](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf). (En ligne). [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014\\_WEB.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf). Document consulté le 3 août 2015.
8. Gsänger, S., et J.-D. Pitteloud. 2015. [Small Wind World Report Summary](http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/12/Summary_SWWR2015_online.pdf). (En ligne). Bonn, World Wind Energy Association. [http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/12/Summary\\_SWWR2015\\_online.pdf](http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/12/Summary_SWWR2015_online.pdf). Document consulté le 3 août 2015.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2011. [IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation](http://srren.ipcc-wg3.de/report). (En ligne). <http://srren.ipcc-wg3.de/report>. Site consulté le 7 août 2015.
10. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2020. [Renewable Capacity Statistics 2020](https://irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020). <https://irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>. Site consulté le 2 décembre 2020.
11. Moreira Chagas, C. C., et autres. 2020. « From Megawatts to Kilowatts: A Review of Small Wind Turbine Applications, Lessons from The US to Brazil », *Sustainability*, vol. 12, n° 7. doi:10.3390/su12072760.
12. Powys UK. 2011. [Small Wind Turbine Planning Guidance Note](http://brecon-leisurecentre.powys.gov.uk/uploads/media/Small_Windfarm_Guidance_en_03.pdf). (En ligne). [http://brecon-leisurecentre.powys.gov.uk/uploads/media/Small\\_Windfarm\\_Guidance\\_en\\_03.pdf](http://brecon-leisurecentre.powys.gov.uk/uploads/media/Small_Windfarm_Guidance_en_03.pdf). Document consulté le 7 août 2015.
13. Canadian Energy Regulator. 2020. [The Economics of Solar Power in Canada](https://www.cer-rec.gc.ca/nrg/sttstc/lctrc/rprt/cnmcsfslrprw/index-eng.html). (En ligne). <https://www.cer-rec.gc.ca/nrg/sttstc/lctrc/rprt/cnmcsfslrprw/index-eng.html>. Site consulté le 27 novembre 2020.
14. Hydro-Québec. s. d. [Centrales solaires de La Cité et de l'IREQ](https://www.hydroquebec.com/projets/solaire-monteregie/). (En ligne). <https://www.hydroquebec.com/projets/solaire-monteregie/>. Site consulté le 27 novembre 2020.
15. Agence internationale de l'Énergie (AIE). 2020. [Global Energy Review 2020](https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables). (En ligne). <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables>. Site consulté le 27 novembre 2020.
16. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2020. [Statistiques de capacité renouvelable 2020](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf). (En ligne). [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2020.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf). Document consulté le 27 novembre 2020.
17. National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2020. [Best Research-Cell Efficiencies](https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200803.pdf). (En ligne) <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200803.pdf>. Document consulté le 27 novembre 2020.

© Hydro-Québec

Reproduction autorisée  
avec mention de la source

Février 2021

2020G916F-6