

FILIÈRE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE



L'ÉNERGIE DU SOLEIL



ÉNERGIE SOLAIRE

PHOTOVOLTAÏQUE :
ÉNERGIE RÉCUPÉRÉE

À PARTIR DE LA
LUMIÈRE DU SOLEIL
ET TRANSFORMÉE
DIRECTEMENT EN
ÉLECTRICITÉ, AU
MOYEN DE CAPTEURS
PHOTOVOLTAÏQUES.

ÉTAT DE LA SITUATION

L'industrie photovoltaïque mondiale a beaucoup progressé depuis une décennie. Sa capacité installée est passée de 1 790 MW à 137 000 MW sur la période 2001-2013 – c'est 40 % d'augmentation en moyenne par année. En 2013, la filière solaire photovoltaïque représentait environ 1 % du bilan mondial de production d'électricité et 4 % de la puissance installée disponible.



En couverture : Panneaux photovoltaïques au sol.

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

Les [systèmes photovoltaïques](#) raccordés à un réseau électrique occupent 95 % du marché actuel et les systèmes hors réseau, 5 %.

Au Québec, la filière solaire photovoltaïque à production centralisée en est à l'étape de l'expérimentation. Quant à la production décentralisée, bien que peu répandue encore, elle existe bel et bien.

POTENTIEL SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

La ressource solaire 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. La ressource est indisponible en période de pointe hivernale au Québec (matin et soir). En conséquence, le système photovoltaïque doit être adapté à la grande variation d'ensoleillement entre les saisons d'hiver et d'été, particulièrement dans le nord du Québec.

Au Québec, la disponibilité variable de la ressource a de multiples impacts d'ordre technique dans le cas d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, surtout si la capacité installée globale ou locale devient importante. Ultiment, ces contraintes techniques influenceront, pour une question de prix, le choix d'un tel système de production d'électricité.

Dans le sud du Québec où se concentre la grande majorité de la population, le facteur d'utilisation annuel d'un système photovoltaïque avoisine 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.

POUR EN SAVOIR D'AVANTAGE

- [Effet photovoltaïque](#)
- [Types de technologies](#)
- [Procédés de production d'énergie solaire](#)
- [Ensoleillement intermittent](#)
- [Insolation journalière](#)
- [Coûts moyens](#)
- [Systèmes et réseaux](#)
- [Changements climatiques et qualité de l'air](#)
- [Analyse du cycle de vie](#)
- [Écosystèmes et biodiversité](#)
- [Santé et qualité de vie](#)
- [Aménagement du territoire](#)
- [Économie régionale](#)
- [Acceptabilité sociale](#)

RENDEMENT ET COÛTS

En 2014, le rendement de conversion des modules photovoltaïques utilisés pour les microréseaux électriques atteint en moyenne 15 %. Celui des cellules multijonctions dépasse 40 %, mais leur coût de fabrication est encore trop élevé pour un déploiement à grande échelle. Toutes les technologies photovoltaïques, étant plus ou moins sensibles à la température, affichent un rendement et une puissance qui peuvent varier sous une même insolation jusqu'à 30 % entre les saisons d'été et d'hiver.

Le principal frein à l'essor de la filière solaire photovoltaïque reste les coûts d'investissement. Au cours de la dernière décennie, une industrie est née à coups d'incitatifs généreux au développement surtout de systèmes raccordés à un réseau électrique. Ces dernières années cependant, on a observé une importante [baisse des coûts](#).

Au Québec, les coûts d'investissement actuels (2014) d'un petit système photovoltaïque raccordé à un réseau restent encore supérieurs à ceux de la filière éolienne ou de la filière hydro-électrique (projets d'Hydro-Québec).

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

- Production intermittente, parfois difficile à prévoir selon l'heure du jour, les conditions climatiques et la saison de l'année.
- Production optimisée avec l'utilisation d'un système de stockage d'énergie.
- Aucune pièce en mouvement.
- Concept évolutif ou modulaire (modules ajoutés au besoin), permettant d'augmenter la puissance installée, dimension variable.

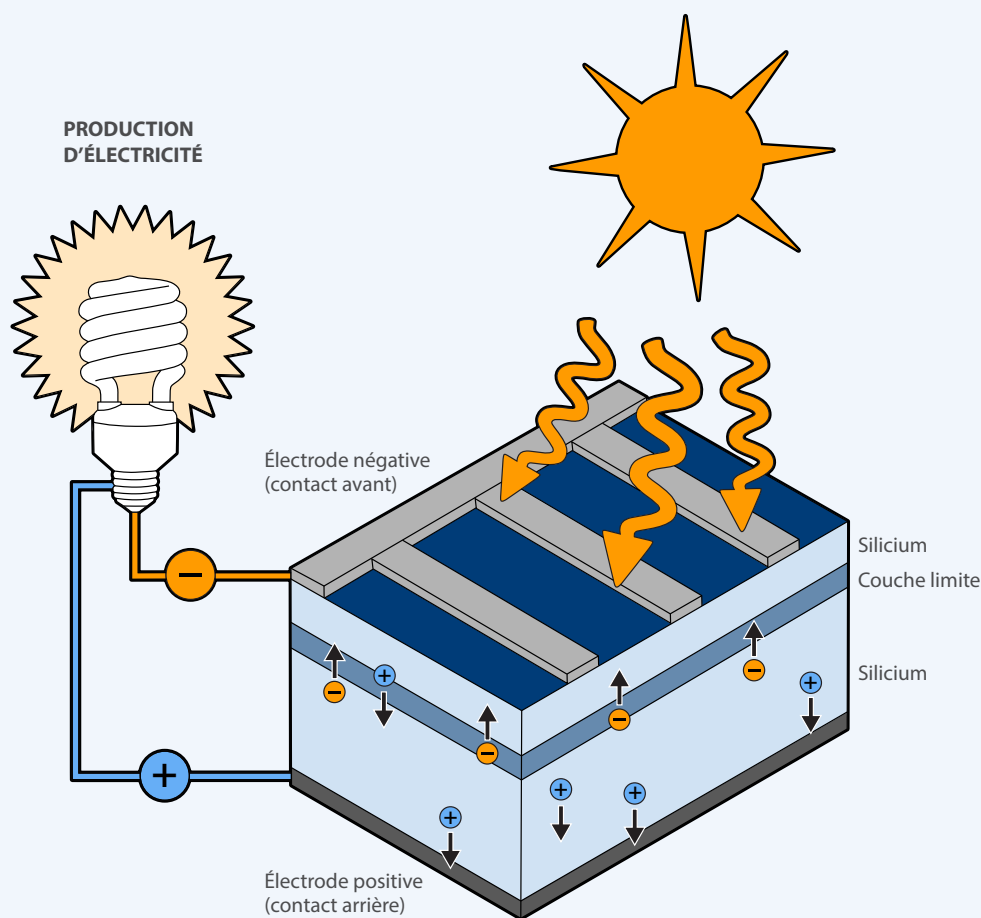
- Fiabilité, longue durée de vie (environ 30 ans).
- Peu d'entretien, coût d'exploitation peu élevé.
- Grand potentiel de sites d'implantation (bâtiments, pare-soleil de stationnements, espaces ouverts, etc.).
- Système au sol requérant un grand espace.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

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

- Effet visuel : nombre d'unités, 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 à des fins de refroidissement et de nettoyage, génération d'eaux usées.
- Augmentation des risques de dégradation du sol, par exemple 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.

UNE RESSOURCE DURABLE



Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de photons lumineux en courant électrique par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur. La majorité des capteurs photovoltaïques actuels, à base de silicium monocristallin ou polycristallin, prend la forme de panneaux et est posée à plat sur les toits d'édifices ou d'habitations.

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.

Types de technologies

Il existe dans le monde diverses technologies photovoltaïques, qui ont atteint différents niveaux de développement.

Panneau photovoltaïque

- **Silicium cristallin** – fines tranches coupées à partir d'un cristal de silicium (monocristallin) ou d'un bloc de cristaux de silicium (polycristallin). Les principaux types de cellules cristallines sont la monocristalline, la polycristalline et le ruban. Leur fabrication requiert beaucoup de matière première et d'énergie.

- **Couches minces** – fines couches d'un matériau photosensible déposées sur un support (verre, acier inoxydable ou plastique). Les principaux types de matériaux sont le silicium amorphe, le tellure de cadmium, le diséléniure de cuivre et d'indium ou le cuivre-indium-gallium-sélénium. Leur fabrication requiert moins de matière première et d'énergie.
- **Cellules flexibles** – constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible. Leur fabrication requiert un minimum de matière première et d'énergie.

Concentrateur

Un concentrateur optique focalise la lumière du soleil sur les cellules photovoltaïques (placées à l'intérieur d'un collecteur) au moyen d'une lentille ou de miroirs. Utilise généralement une petite quantité de cellules multijonctions qui offrent des rendements de conversion records, dépassant 40 %.

Procédés de production d'énergie solaire

Production d'énergie solaire photovoltaïque

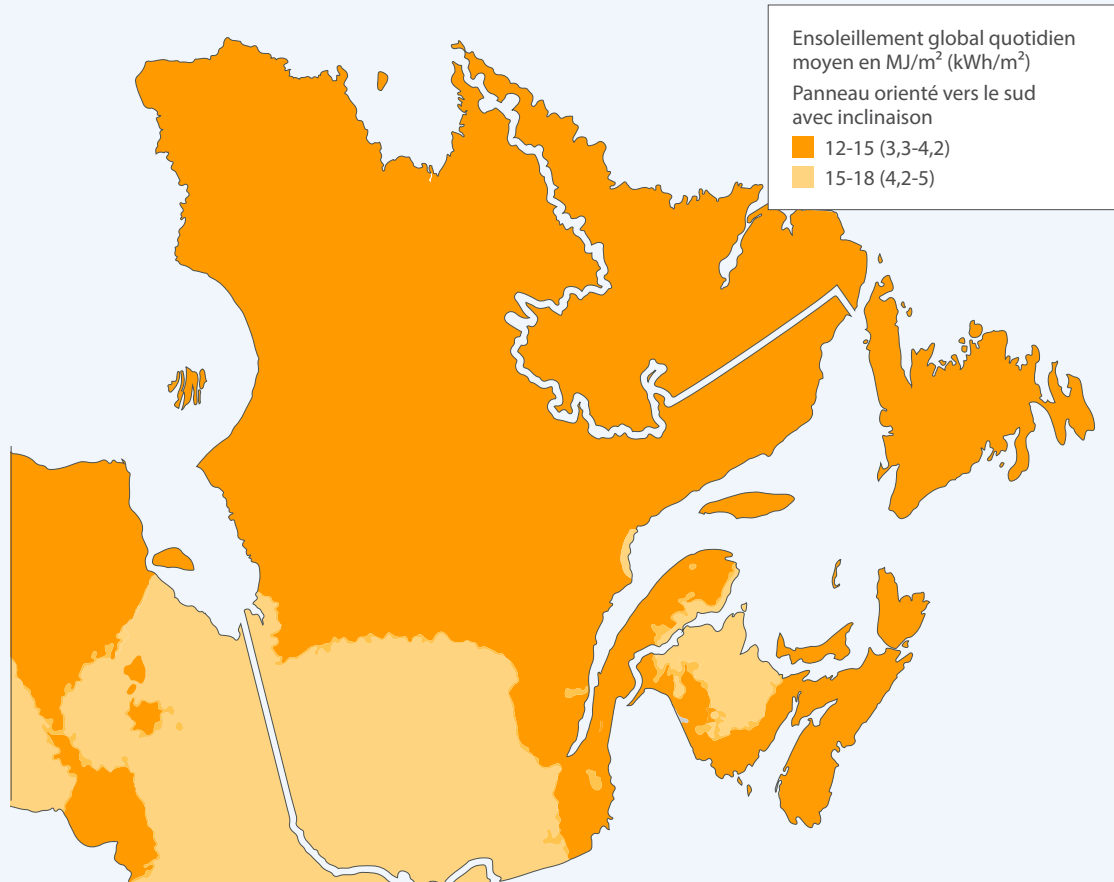
- **Dispositif photovoltaïque autonome** – alimente un système de faible puissance, comme la signalisation optique, la recharge de batterie et l'alimentation des satellites.
- **Système installé sur un bâtiment, relié ou non à un réseau électrique** – alimente ce bâtiment. L'autoprodacteur peut satisfaire ses besoins en énergie et vendre ses surplus à un tiers.

- **Parc ou centrale photovoltaïque raccordée à un réseau électrique** – produit de l'énergie électrique directement par effet photovoltaïque.

Autres procédés de production d'énergie solaire

- **Solaire passif** – l'orientation et la fenestration de l'habitation ainsi que l'installation de faux murs thermiques ou de fenêtres électrochromes permettent d'optimiser l'apport calorifique solaire pour le chauffage et la climatisation.
- **Solaire thermique** – génère seulement de la chaleur et comprend l'utilisation d'un fluide caloporteur, de capteurs vitrés ou non vitrés ou à tube sous vide ou d'autres matériaux capteurs. Parmi les applications classiques, il y a les chauffe-eau et les chauffe-piscines.
- **Solaire héliothermodynamique** – le concentrateur, ou capteur solaire, utilise le rayonnement direct et rassemble celui-ci grâce à des feuilles métalliques réfléchissantes de diverses formes (plan, cylindre, antenne parabolique), sur une surface collectrice placée au foyer. Selon le niveau de concentration, la température peut atteindre de 350 °C à plus de 1 000 °C au foyer. La chaleur obtenue permet d'alimenter un générateur de vapeur pour produire de l'électricité. Cette technologie est la plupart du temps utilisée dans les régions désertiques.

DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DE L'INSOLATION* JOURNALIÈRE MOYENNE AU QUÉBEC



Source : Ressources naturelles Canada.

* Insolations : quantité de rayonnement solaire direct, incident, par unité de surface horizontale exposée, à un niveau donné, exprimée en W/m².

Ensoleillement intermittent

L'ensoleillement varie de façon importante en fonction du temps. Cela influe en proportion sur la production d'énergie photovoltaïque :

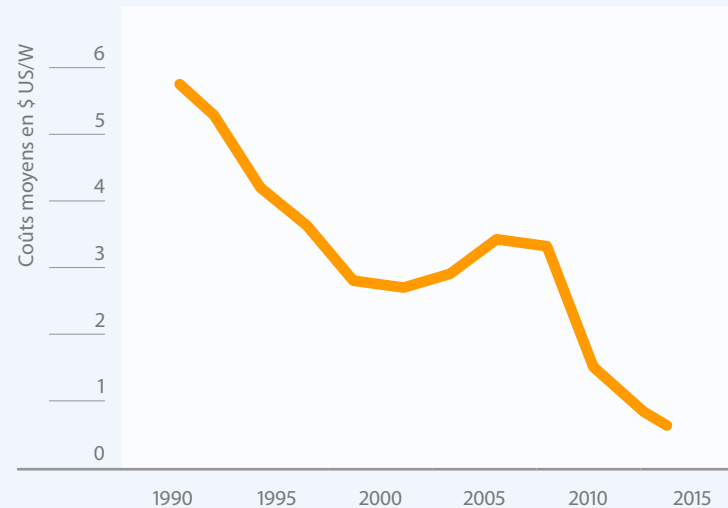
- **Variation jour-nuit** – par une journée sans nuages, l'intensité de l'ensoleillement passe d'environ 1 000 W/m² au maximum vers midi à près de 0 W/m² aussitôt la nuit tombée. Variation de la production prévisible.
- **Couverture nuageuse** – la présence de nuages diminue l'ensoleillement, ce qui 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). Variation de la production plus ou moins prévisible.
- **Variation quatre saisons** – 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 davantage encore à mesure qu'on augmente en latitude. Variation de la production prévisible.

Insolation journalière

Au Québec, l'insolation moyenne de la partie la plus habitée (orange pâle : 4,2 à 5 kWh/m²) est considérable. C'est plus qu'en Allemagne et au Japon, leur niveau d'insolation étant comparable à celui de la partie centrale du Québec (orange plus foncé : 3,3 à 4,2 kWh/m²). Néanmoins, ces deux pays sont actuellement les chefs de file du marché mondial de l'énergie solaire photovoltaïque.

Coûts moyens

COÛTS MOYENS D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE À BASE DE SILICIUM CRISTALLIN – 1990-2013



Depuis quelques années, le marché de l'énergie solaire photovoltaïque connaît une restructuration importante, ce qui a pour effet d'en réduire les coûts constamment. Au Canada, les coûts d'investissement d'un système photovoltaïque (> 100 kW) raccordé à un réseau électrique sont passés de 1 \$/kWh à moins de 0,35 \$/kWh sur la période 2002-2014. La hausse de coûts observée pour les modules photovoltaïques entre 2004 et 2008 correspond à un épisode de pénurie de silicium cristallin dans le monde, qui a fait place à un silicium développé spécifiquement pour l'industrie. Sur la période 2009-2014, la production de modules photovoltaïques a continué d'augmenter, et les coûts d'investissement n'ont pas cessé de diminuer. On estime que dorénavant la tendance à la baisse devrait se stabiliser autour de 0,75 \$/W.

Systemes et réseaux

Les systèmes photovoltaïques sont raccordés ou non à un réseau électrique.

Systemes raccordés à un réseau électrique

- Système relié à un bâtiment utilisant de l'électricité.
- Système intégré à une structure qui est raccordée à un système ou à un réseau électrique (par exemple, couverture de 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 centralisée alimente un réseau électrique.

Systemes hors réseau

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

Changements climatiques et qualité de l'air

Pour la filière solaire photovoltaïque, les émissions de gaz à effet de serre et de contaminants atmosphériques sont associées à la fabrication et à l'installation de l'équipement. En exploitation, les systèmes photovoltaïques ne génèrent pas d'émissions. Les émissions attribuables à la fabrication de l'équipement

dépendent majoritairement des types d'énergies utilisés dans la région où sont fabriqués les composants.

Analyse du cycle de vie

Les principaux impacts environnementaux de la filière solaire photovoltaïque seraient en général, selon l'approche du cycle de vie, légèrement supérieurs à ceux de la filière hydroélectrique et des autres filières d'énergie renouvelable. La durée de vie des systèmes, les conditions d'ensoleillement et la fabrication des panneaux sont les éléments qui comptent le plus dans l'analyse du cycle de vie de cette filière.

Rapports complets de la [Comparaison des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique](#) et de l'[ACV des filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle](#).

Écosystèmes et biodiversité

L'installation d'un système ou d'un parc photovoltaïque au sol pourrait avoir des impacts sur le milieu naturel: érosion, légère modification de la couverture végétale, etc. Le principal risque toucherait la faune, en particulier celle qui serait obligée de se déplacer en raison de la pose d'une clôture sur un terrain parfois d'une bonne superficie. Les grands projets devraient prévoir des ouvertures et des corridors pour faciliter le passage des animaux. Parmi les effets bénéfiques de la présence de ce type d'équipement dans les régions arides, il y aurait 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.

La gêne causée par la présence d'équipements photovoltaïques à la faune aérienne (oiseaux et insectes) serait très limitée et beaucoup plus faible que celle causée par la présence d'autres types d'infrastructures. L'idée selon laquelle les oiseaux aquatiques pourraient confondre les modules photovoltaïques et les plans d'eau serait non fondée. Une étude menée en Allemagne qui portait sur un parc photovoltaïque adjacent à un immense bassin de retenue du canal Main-Danube n'a pas été concluante à cet égard.

Le nettoyage des panneaux nécessite quantité d'eau, ce qui pourrait réduire la disponibilité de la ressource pour la faune et la flore dans certaines régions. Toutefois, les besoins en eau pour la filière solaire photovoltaïque seraient bien moindres que ceux de la filière thermique (par exemple, le charbon et le nucléaire).

Santé et qualité de vie

Certains composants des matériaux utilisés dans la fabrication d'un système photovoltaïque, comme le tellure de cadmium, sont préoccupants sur le plan de la toxicité. Toutefois, ils sont utilisés en faible quantité lors de la fabrication et ne sont pas émis 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 au charbon. Par ailleurs, une fois les cellules 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 sert à 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 de l'éclairage électrique et de cuisinières électrique ou solaire est bénéfique pour la santé, au contraire de l'usage du bois et des produits pétroliers à l'intérieur des maisons, qui génère des émissions de contaminants atmosphériques.

Aménagement du territoire

Le parc photovoltaïque occupe au sol certes plus d'espace qu'un parc éolien, mais son impact visuel reste moindre. En voici les raisons:

- Sa structure horizontale atteint quelques mètres de hauteur, ce qui le rend peu visible même pour un observateur se trouvant à proximité.
- Il présente une gamme de couleurs passe-partout – entre le bleu moyen et le gris foncé.
- Il est immobile – il n'a aucune pièce en mouvement qui pourrait attirer l'œil, l'attention.

À souligner, une centrale solaire photovoltaïque ne prend pas plus d'espace au sol qu'une centrale au charbon aux États-Unis. En effet, sur la durée de vie d'une centrale au charbon (25 ans), les activités de production et de transport occupent beaucoup d'espace.

Un système photovoltaïque intégré à un bâtiment peut représenter un impact visuel ou un impact sur le paysage, mais dans une moindre mesure que les systèmes au sol. Placé sur un toit, il a l'avantage de n'utiliser aucune parcelle de terrain.

Il pourrait y avoir des conflits d'usages entre les exploitations agricoles et les systèmes photovoltaïques. Or, les systèmes photovoltaïques peuvent être placés dans toutes sortes d'endroits: terrains vagues, friches industrielles, abords d'infrastructures routières, ferroviaires ou aéroportuaires, etc. Ils pourraient même être compatibles avec certaines pratiques agricoles, comme l'élevage d'ovins ou l'apiculture et les petites cultures maraîchères.

Économie régionale

Mettre en place une filière solaire photovoltaïque coûte cher, mais peut générer des emplois et des retombées économiques locales lors de la construction 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 revenu. Les retombées économiques locales peuvent être importantes si le propriétaire, l'installateur et le matériel du système photovoltaïque proviennent du milieu d'accueil. De plus, l'entretien de l'équipement, minimal, serait facilement réalisable par le milieu, et les ressources seraient disponibles. À noter: le nombre d'emplois créés par mégawattheure produit est plus élevé pour la filière solaire photovoltaïque que pour la filière thermique.

Acceptabilité sociale

De façon générale, la filière solaire photovoltaïque 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:

- Un soutien gouvernemental aux municipalités de manière à créer les conditions favorables.
- Une meilleure connaissance des impacts potentiels des technologies en développement.

RÉFÉRENCES

1. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. [L'essentiel sur ... l'énergie solaire](http://www.cea.fr/jeunes/themes/les-energies-renouvelables/l-essentiel-sur-l-energie-solaire). (En ligne). 2014. <http://www.cea.fr/jeunes/themes/les-energies-renouvelables/l-essentiel-sur-l-energie-solaire>. Site consulté le 10 novembre 2014.
2. Environnement Canada. [Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies](http://www.ec.gc.ca/scitech/B53B14DE-034C-457B-8B2B-39AFCFED04E6/ForContractor_721_Solar_Photovoltaic_Technology_e_09%20FINAL-update%202-s.pdf). (En ligne). 2012. http://www.ec.gc.ca/scitech/B53B14DE-034C-457B-8B2B-39AFCFED04E6/ForContractor_721_Solar_Photovoltaic_Technology_e_09%20FINAL-update%202-s.pdf. Document consulté le 10 novembre 2014.
3. European Photovoltaic Industry Association. [Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018](http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/). (En ligne). 2014. <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/>. Document consulté le 10 novembre 2014.
4. Four Peaks Technology. [Solar Cell Central – Solar Electricity Costs](http://solarcellcentral.com/cost_page.html). (En ligne). Sans date. http://solarcellcentral.com/cost_page.html. Site consulté le 10 novembre 2014.
5. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Sources d'énergie renouvelable et atténuation du changement climatique](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_fr.pdf). (En ligne). 2011. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_fr.pdf. Document consulté le 10 novembre 2014.
6. International Energy Agency. [Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy.html). (En ligne). 2010. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy.html>. Document consulté le 10 novembre 2014.
7. International Renewable Energy Agency. [Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Volume 1: Power Sector – Solar Photovoltaics](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf). (En ligne). 2012. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf. Document consulté le 10 novembre 2014.
8. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. [Installations photovoltaïques au sol – Guide de l'étude d'impact](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Installations-photovolt-au-sol_guide_DEF_19-04-11.pdf). (En ligne). 2011. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Installations-photovolt-au-sol_guide_DEF_19-04-11.pdf. Document consulté le 10 novembre 2014.
9. National Renewable Energy Laboratory. [Best Research-Cell Efficiencies](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg). (En ligne). 2014. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg. Page consultée le 10 novembre 2014.
10. Photovoltaïque.info. [Intégration dans l'environnement](http://www.photovoltaïque.info/Integration-dans-l-environnement.html). (En ligne). 2014. <http://www.photovoltaïque.info/Integration-dans-l-environnement.html>. Site consulté le 10 novembre 2014.
11. Ressources naturelles Canada. [Cartes d'ensoleillement et du potentiel d'énergie solaire photovoltaïque du Canada](http://pv.rncan.gc.ca/index.php). (En ligne). 2013. <http://pv.rncan.gc.ca/index.php>. Site consulté le 10 novembre 2014.
12. SPIE. [The business of photonics Optic.org – EPIA: 37GW of solar capacity added in 2013 but new EU targets needed](http://optics.org/news/5/3/14). (En ligne). 2014. <http://optics.org/news/5/3/14>. Page consultée le 10 novembre 2014.
13. Turney, D., Fthenalis, V. 2011. [Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants](http://www.bnl.gov/pv/files/pdf/229_rser_wildlife_2011.pdf). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 3261-3270. (En ligne). http://www.bnl.gov/pv/files/pdf/229_rser_wildlife_2011.pdf. Document consulté le 10 novembre 2014.

Reproduction autorisée
avec mention de la source

Dépôt légal – 4^e trimestre 2014
Bibliothèque et Archives nationales
du Québec
ISBN : 978-2-550-72002-7
2014G351-4