

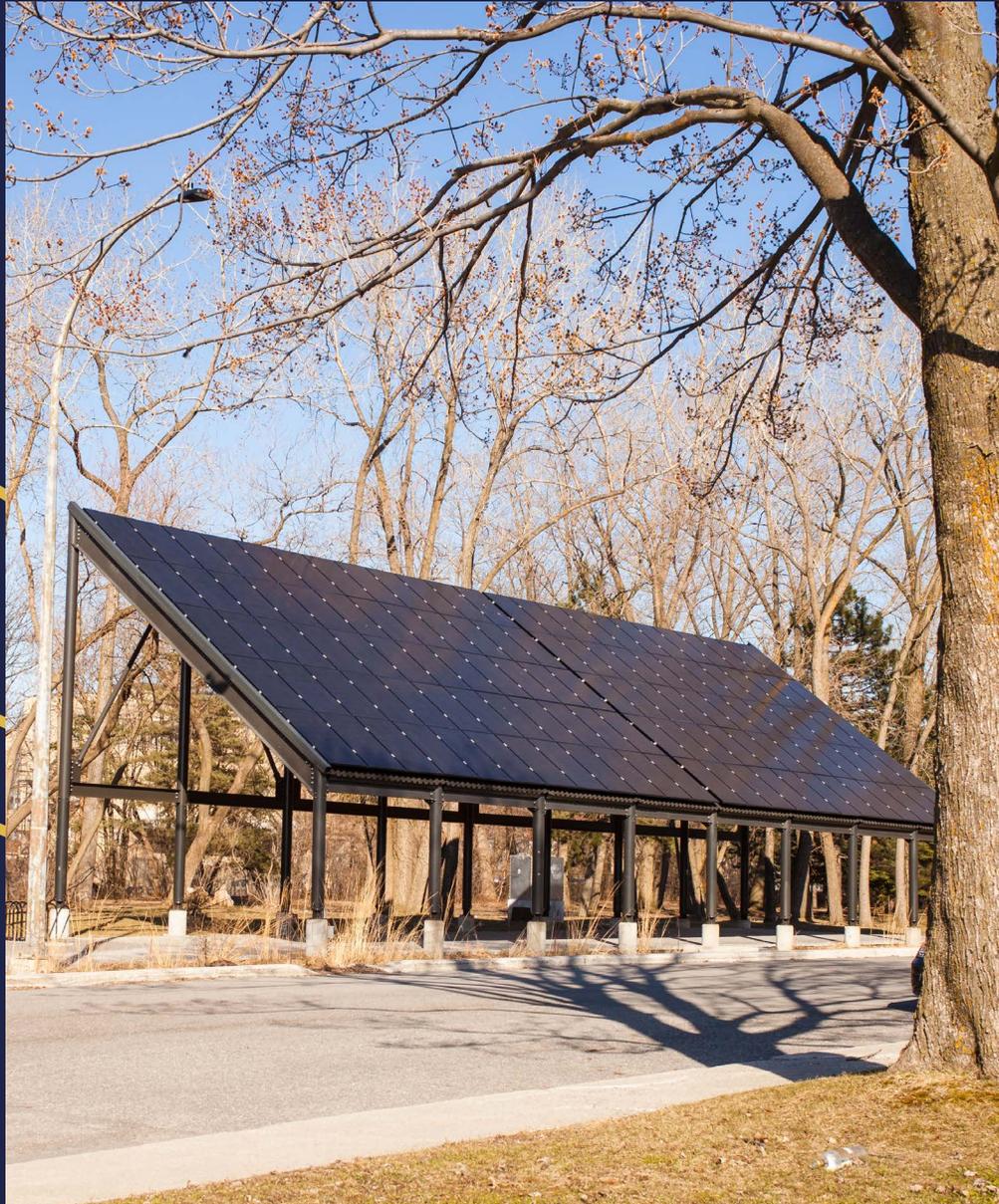


Union des
municipalités
du Québec

EN COLLABORATION AVEC

NERGICA

Recherche et
innovation en énergies
renouvelables



ÉNERGIE SOLAIRE TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Fiche technique

TABLE DES MATIÈRES

1. La technologie photovoltaïque	1
1.1 Présentation de l'énergie solaire	1
1.2 Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	1
1.3 Types de technologies solaires photovoltaïques	2
1.4 Différentes applications des installations solaires PV	3
1.5 Composants d'un système solaire photovoltaïque	3
2. L'énergie solaire et l'environnement	5
2.1 Les impacts environnementaux	5
2.2 Le solaire et la biodiversité	6
2.3 Le solaire dans le paysage	7
2.4 Les avantages environnementaux des installations solaires	8
2.5 L'impact socio-économique de l'énergie solaire	9
2.5.1 Les retombées économiques	9
2.5.2 L'acceptabilité sociale	10
Bibliographie.....	11

1. LA TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1. Présentation de l'énergie solaire

Le Soleil, une étoile située au cœur de notre système solaire, est une boule de gaz, principalement composée d'hydrogène. À l'intérieur de son noyau, des conditions extrêmes de température (environ 15 millions de degrés Celsius) et de pression intense favorisent des réactions nucléaires continues de fusion. Ces réactions consistent en la transformation des atomes d'hydrogène en hélium par fusion nucléaire; un processus qui libère d'énormes quantités d'énergie. Cette énergie se manifeste sous forme de chaleur et d'ondes électromagnétiques, couvrant un large spectre de longueurs d'onde, allant des rayons ultraviolets à la lumière visible et aux rayons infrarouges^[1].

L'énergie émise par le Soleil traverse l'espace sous forme de rayonnement solaire et atteint la Terre, jouant un rôle fondamental dans la régulation des conditions nécessaires à la vie. C'est cette énergie solaire qui rend notre planète habitable, fournissant la lumière et la chaleur indispensables pour les processus biologiques, comme la photosynthèse, essentielle pour l'agriculture et les écosystèmes. De plus, l'énergie solaire est la source première qui alimente les cycles climatiques et la production d'énergie thermique naturelle.

Avec l'évolution technologique, les scientifiques ont su capter et exploiter cette énergie solaire pour produire de l'électricité. Ce processus repose en partie sur un phénomène découvert en 1839 par le physicien Edmond Becquerel, appelé effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque désigne la génération d'un courant électrique lorsqu'un matériau est exposé à la lumière^[2]. Ce principe est à la base du fonctionnement des panneaux solaires, qui convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité. Ce processus, désormais exploité à grande échelle, constitue une source d'énergie renouvelable et propre, jouant un rôle clé dans la transition énergétique mondiale.

1.2. Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se fait à partir des cellules photovoltaïques, qui sont les composants de base d'un panneau photovoltaïque, appelé aussi module photovoltaïque.

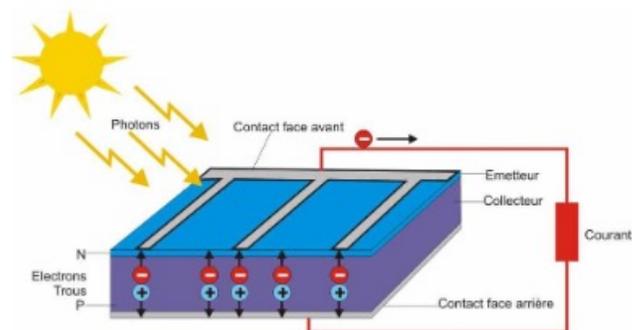


Figure 1 -
Fonctionnement d'une cellule solaire PV^[3]

L'effet photovoltaïque utilise les propriétés des semi-conducteurs, comme le silicium, pour transformer la lumière en électricité. Les photons, porteurs d'énergie solaire, libèrent des électrons lorsqu'ils frappent le silicium, générant un mouvement des électrons. Ce mouvement qui libère des électrons de leur position initiale créant des paires électron-trou. Pour orienter ces électrons et produire un courant électrique, on dope différemment les deux faces du silicium (dopage type N et type P); la face exposée au soleil est dopée en phosphore créant une zone négative, tandis que l'autre face, dopée au bore, forme une zone positive. Ce dopage crée un champ électrique qui guide les électrons vers la zone négative et les trous vers la zone positive. Les électrons sont ensuite captés par des contacts électriques et dirigés vers un circuit extérieur pour fournir un courant électrique continu ^[4].

1.3. Types de technologies solaires photovoltaïques

Afin d'optimiser l'efficacité des panneaux solaires, les recherches et développement se multiplient. Parmi ces innovations, trois technologies ont atteint un niveau avancé de maturité ^[5].

Les cellules en silicium : La première génération de cellules photovoltaïques est composée de cellules monocristallines (c-Si), fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium, et de cellules polycristallines (mc-Si), constituées de cristaux fusionnés. Bien que les cellules monocristallines soient plus coûteuses que les polycristallines, ces deux types dominent en occupant plus de 90% du marché, grâce à leur efficacité élevée, qui varie entre 20 % et 26 %.

Les cellules en couches minces : Ces cellules sont fabriquées à partir de plusieurs couches de matériaux photosensibles, comme le silicium amorphe (a-Si), le séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS) et le tellure de cadmium (CDTE). Cette deuxième génération de cellules photovoltaïques utilise des procédés de fabrication plus simples et moins coûteux que la première génération, mais avec une efficacité inférieure, soit entre 21% et 23.35 %.

Les cellules des technologies émergentes : Cette troisième génération inclut les cellules pérovskites, qui sont encore récentes, mais qui présentent un rendement prometteur de 25.2% et des coûts de production potentiellement réduits. Les cellules organiques (OPV) font aussi partie de cette catégorie, en étant à la fois flexibles et légères, avec des coûts de fabrication relativement bas. Cependant, elles démontrent une efficacité faible de 15.2 %.

1.4. Différentes applications des installations solaires PV

On distingue principalement deux catégories d'installations photovoltaïques : celles raccordées au réseau et celles non raccordées.

Parmi celles qui sont connectées au réseau, on retrouve :

- **Centrale solaire photovoltaïque à grande échelle, appelée aussi « parc solaire ».** D'une capacité de plus de 1 MW, ces installations sont reliées au réseau de distribution ou de transport.
- **Système photovoltaïque résidentiel connecté au réseau.** Ce type de système dispose d'une capacité inférieure à 20 kW.
- **Système photovoltaïque commercial et industriel (C&I).** Ces systèmes, installés soit au sol soit sur les toits des bâtiments commerciaux ou industriels, disposent d'une capacité comprise entre 20 kW et 1 MW.

Installation non raccordée au réseau :

- **Système photovoltaïque autonome hors réseau.** Non connectés au réseau électrique, ces systèmes sont montés au sol ou sur les toits, avec une capacité généralement inférieure à 1 MW. Ils peuvent alimenter des habitations, des chalets saisonniers ou des bâtiments isolés et hors réseau.

1.5. Composants d'un système solaire photovoltaïque

Afin de générer, stocker et distribuer efficacement l'électricité, plusieurs composants sont nécessaires au fonctionnement d'un système solaire :

- **Panneau solaire (appelé aussi « module photovoltaïque ») :** Il s'agit du composant principal d'un système photovoltaïque qui capte l'irradiation solaire et la convertit en électricité de courant continu (DC) grâce à l'effet photovoltaïque.
- **Système de fixation :** C'est la structure qui soutient les panneaux solaires et les maintient en place, que ce soit sur le toit, au sol ou sur d'autres structures. Il garantit que les panneaux sont positionnés selon l'angle et l'orientation qui permettront un rendement optimal.
- **Onduleur :** Il convertit le courant continu (DC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (AC), et qui est utilisée par la plupart des appareils ménagers.
- **Système de stockage d'énergie ou batteries (pour les systèmes hors réseau et hybrides) :** Les batteries stockent l'excédent d'électricité générée pendant la journée pour en permettre l'utilisation la nuit ou pendant les périodes nuageuses
- **Contrôleur de charge (pour les systèmes hors réseau) :** Les systèmes solaires hors réseau ont besoin d'un contrôleur de charge pour réguler le flux d'électricité entre les panneaux solaires et le système de stockage de batteries pour éviter la surcharge ou la décharge excessive des batteries.

- **Bilan du système (Balance of the system) :**
Ce terme fait référence à l'ensemble des composants d'un système photovoltaïque (excluant les panneaux solaires) qui garantissent l'équilibre et le bon fonctionnement du système. Ces éléments comprennent les onduleurs, les contrôleurs de charge, les câbles, les boîtiers de connexion, les systèmes de surveillance, les structures de support des panneaux et les batteries.
- **Système de comptage (pour les systèmes connectés au réseau) :** Si le système est connecté au réseau, un compteur est installé pour mesurer la quantité d'électricité générée par les panneaux solaires et/ou la quantité d'électricité renvoyée sur le réseau. Cela est important pour la compensation énergétique, permettant aux propriétaires de recevoir des crédits ou autres compensations pour l'excédent d'électricité produit.
- **Réseau électrique (pour les systèmes connectés au réseau) :** Pour les systèmes solaires connectés au réseau, le réseau électrique sert de source d'alimentation de secours lorsque les panneaux solaires ne produisent pas suffisamment d'électricité ou sert à recevoir l'excédent d'électricité générée par le système PV.



Photo : Hydro-Québec

2. L'ÉNERGIE SOLAIRE ET L'ENVIRONNEMENT

2.1. Les impacts environnementaux

Pour évaluer l'impact environnemental des panneaux solaires, il est important de considérer l'ensemble de leur cycle de vie; de l'extraction des matières premières utilisées dans leur fabrication jusqu'au recyclage de leur composants en fin de vie. Ce cycle de vie couvre plusieurs étapes clés, telles que l'extraction des matériaux nécessaires à la fabrication des panneaux, leur transport jusqu'aux sites d'installation, la construction ou l'installation des systèmes solaires, leur exploitation, ainsi que le traitement des panneaux une fois arrivés en fin de vie. Chacune de ces phases peut entraîner des impacts environnementaux différents, comme la perturbation des habitats naturels, la consommation d'énergie, l'émission des gaz à effet de serre. Une analyse détaillée de chacune de ces étapes permet de mieux comprendre les bénéfices et les inconvénients que peuvent présenter les installations solaires.

L'extraction et la fabrication

La production de panneaux solaires repose sur diverses matières premières, dont le silicium pour les panneaux photovoltaïques traditionnels et le tellure de cadmium pour les panneaux à couches minces, les métaux (cuivre, argent, aluminium) et les pérovskites. L'extraction de ces matériaux peut avoir certains effets sur l'environnement, notamment la coupe d'arbres, la perturbation des habitats naturels et l'érosion des sols. De plus, la fabrication des panneaux, qui nécessite une certaine quantité d'énergie, dont la provenance peut entraîner une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, selon la source énergétique utilisée dans le processus. En revanche, il est estimé qu'un panneau solaire met généralement entre 1,5 et 2,5 ans pour produire l'énergie consommée pendant sa fabrication^[6].

Le transport et l'installation

Après leur fabrication, les panneaux solaires sont transportés jusqu'aux sites d'installation. Ce transport, qui utilise des camions, des bateaux ou des trains, consomme des carburants fossiles et génère ainsi des émissions de gaz à effet de serre, notamment de CO₂. Lors de l'installation de grands parcs solaires, des aménagements de terrain, tels que le nivellement et parfois l'enlèvement de végétation, sont nécessaires, ce qui peut détruire des habitats naturels et altérer le paysage^[7].

La phase d'opération

Pendant la phase d'exploitation, les panneaux solaires génèrent de l'électricité de manière propre et sans émissions directes de gaz à effet de serre. Cependant, les centrales solaires thermiques et certaines installations photovoltaïques nécessitent un entretien régulier qui peut inclure l'utilisation d'eau pour le nettoyage des panneaux, particulièrement dans les zones désertiques où la poussière s'accumule. Cela peut poser des défis en matière de gestion et utilisation d'eau en exerçant la pression sur les ressources hydriques locales.

Les panneaux en fin de vie et leur recyclage

Avec la croissance de l'énergie solaire au niveau mondial et pour répondre à la croissance du volume de panneaux en fin de vie, avec une durée de vie estimée entre 25-30 ans, le recyclage des panneaux permet la récupération et la valorisation des composants afin d'éviter le risque que ces panneaux usagés finissent dans des décharges. Présentement, il est possible de recycler environ 95 % des matériaux utilisés dans la fabrication d'un panneau solaire, dont environ 90 % du silicium, 95 % des matériaux semi-conducteurs et 85 % des cellules des modules photovoltaïques^[8]. Le silicium peut être recyclé jusqu'à quatre fois, quant à l'aluminium utilisé dans le cadre des panneaux solaires et le verre sont entièrement recyclables. Les connexions métalliques, telles que l'argent et le cuivre, sont également réutilisables^[9].

2.2. Le solaire et la biodiversité

Les infrastructures des parcs solaires, bien qu'avantageuses pour réduire les émissions de gaz à effet de serre peuvent avoir des impacts écologiques, notamment sur les habitats et la faune. En effet, malgré qu'elles soient bénéfiques pour la transition énergétique, elles impliquent une occupation des terres pouvant perturber les écosystèmes environnants. En effet, un parc de 1MW peut occuper entre 3.5 à 10 hectares de superficie^[10]. À cause du défrichage et des travaux de construction, ces installations peuvent forcer des animaux à se relocaliser et à s'adapter à de nouveaux habitats. De plus, les clôtures installées autour des grandes installations solaires pour des raisons de sécurité peuvent entraver les déplacements de la faune, limitant leur accès aux ressources nécessaires et impactant potentiellement la biodiversité locale.

Pour atténuer ce problème, des couloirs écologiques peuvent être mis en place afin de maintenir la connectivité des habitats, facilitant le déplacement des animaux et préservant ainsi l'équilibre écologique^[11]. Ces passages pour la faune sont une solution efficace pour réduire les conflits entre les besoins de sécurité des installations solaires et la conservation des écosystèmes naturels.

Il est essentiel de bien planifier l'implantation des projets solaires en priorisant des zones déjà dégradées ou en intégrant des conceptions favorables à la faune locale. Certains dispositifs, comme l'installation de panneaux photovoltaïques au-dessus de structures urbaines (stationnements, toits de bâtiments commerciaux, industriels), permettent également de réduire les impacts sur les habitats naturels et d'optimiser l'utilisation de l'espace^[12].

2.3. Le solaire et la biodiversité

Les installations solaires à grande échelle sont sujettes à certains phénomènes qui peuvent déranger les humains ou d'autres membres de l'écosystème :

L'effet d'éblouissement ^[13] ou l'effet de réflexion des panneaux solaires est généralement perçu comme un problème mineur, bien qu'il puisse devenir plus préoccupant dans certains cas, en particulier près des routes très fréquentées ou des aéroports, où les reflets peuvent constituer un risque temporaire pour la sécurité des conducteurs ou des pilotes. Néanmoins, il a été reconnu que la réflexion ne devrait pas être une préoccupation majeure dans les zones situées entre 30 et 50 degrés en dehors de la direction de déplacement des usagers de la route ^[14]. Les panneaux photovoltaïques modernes réfléchissent seulement environ 2% des rayons directs du soleil, ce qui est similaire à la réflectivité de l'eau et bien inférieur à celle du sol ^[15]. Une grande partie des malentendus entourant l'énergie solaire et les effets de réflexion provient probablement de la confusion entre la technologie photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire concentrée (CSP), qui utilise de grands miroirs pour concentrer et diriger la lumière du soleil vers un point focal. Conçus pour capter la lumière du soleil, les panneaux solaires peuvent occasionnellement produire des reflets, surtout sous des conditions spécifiques comme les faibles angles de lumière, mais dans la plupart des situations, cet effet n'est pas suffisamment puissant pour causer des problèmes significatifs.

Les îlots de chaleur photovoltaïque : Un îlot de chaleur photovoltaïque désigne un phénomène où les panneaux solaires installés sur les toits ou d'autres surfaces génèrent des températures plus élevées localement, surtout pendant la journée. En raison de leur faible albédo (capacité à réfléchir la lumière), tout en produisant de l'électricité les panneaux solaires absorbent une certaine quantité de chaleur ^[16]. Cette chaleur peut augmenter la température de la surface sur laquelle les panneaux sont installés, créant ainsi un effet de réchauffement local, similaire à un îlot de chaleur urbain, mais spécifique aux zones équipées de panneaux photovoltaïques.

Une étude a analysé l'impact des panneaux photovoltaïques installés sur les toits dans différentes villes, dont Kolkata, en Inde, Sydney, Austin, Athènes et Bruxelles. Elle a montré qu'une couverture totale de panneaux photovoltaïques pendant l'été peut considérablement augmenter les températures pendant la journée en raison de la faible capacité des panneaux à réfléchir la lumière, ce qui crée un effet de réchauffement local. En revanche, la nuit, la température des panneaux chute en dessous de celle de l'environnement urbain, ce qui refroidit l'air ambiant. Pour limiter l'impact de ces îlots de chaleurs, des solutions comme des panneaux hybrides intégrés à des systèmes de refroidissement, des toits réfléchissants et de la végétation sur les toits sont suggérées pour augmenter l'efficacité des panneaux et réduire les températures de surface ^[17].

2.4. Les avantages environnementaux des installations solaires

Bien que les panneaux solaires ne soient pas entièrement exempts d'émissions tout au long de leur cycle de vie, ils présentent tout de même de nombreux avantages environnementaux :

- **Réduction à la dépendance aux énergies**

fossiles: Les panneaux solaires offrent des avantages significatifs en matière de réduction des émissions. Selon les études, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes photovoltaïques sont estimées entre 0,07 et 0,18 livre, soit 0.03 et 0.08 kilogramme de CO₂ équivalent par kilowattheure [18]. Cette estimation varie en fonction du type de panneau, de l'emplacement de production et des sources d'énergie utilisées lors de la fabrication. En comparaison, ces émissions restent nettement inférieures à celles des sources d'énergie fossiles, qui émettent jusqu'à 2,2 livre, soit 1kg, de CO₂ par kilowattheure généré [19].

- **Une diminution des émissions de gaz à effet**

de serre responsables du réchauffement climatique, ce qui contribue à protéger les écosystèmes et à limiter les phénomènes comme la désertification, qui affectent la faune et la flore. En effet, le changement climatique modifie les habitats naturels, créant des conditions extrêmes (sécheresses, inondations) qui menacent la survie des espèces animales et végétales. L'apport de l'énergie solaire contribue à mitiger ces retombées néfastes.

- **L'agrivoltaïsme :** Les parcs solaires peuvent produire bien plus que de l'électricité grâce

à l'agrivoltaïsme, une pratique qui associe agriculture et photovoltaïque. Cette approche consiste à installer des cultures ou du bétail sous et entre les rangées de panneaux solaires. Actuellement, les applications les plus courantes et les plus fructueuses de l'agrivoltaïsme dans les projets solaires sont le pâturage de moutons et l'apiculture [20]. Ces pratiques permettent de maintenir les terres en usage agricoles tout en générant des revenus supplémentaires pour les agriculteurs partenaires, en plus de fournir des avantages écologiques pour l'environnement. Les chercheurs continuent d'expérimenter l'agrivoltaïsme pour cultiver fruits et légumes à grande échelle et ces premières méthodes montrent déjà des résultats prometteurs.

- **Valorisation des terres dégradées et/ou des friches industrielles:** Les installations solaires

offrent des opportunités de valorisation écologique des terres dégradées. Ces installations, souvent situées sur des terrains délaissés ou peu propices à l'agriculture, permettent de restaurer des sols appauvris en réduisant l'érosion et en favorisant la régénération de la végétation locale. Ce processus contribue à la biodiversité en créant de nouveaux habitats pour différentes espèces, et les ombrages des panneaux peuvent même servir de refuge pour certains animaux dans des régions aux climats extrêmes. Ces pratiques d'aménagement et de gestion durable autour des installations solaires montrent que l'énergie solaire peut jouer un rôle crucial dans la préservation des écosystèmes tout en fournissant une énergie propre.

• **Impact sur la santé** ^[21]: L'utilisation de l'énergie solaire a un impact significatif sur la santé publique en contribuant à réduire la pollution atmosphérique, notamment les émissions de polluants tels que, le CO₂, les particules fines, les oxydes d'azote (NO_x), et le dioxyde de soufre (SO₂), qui sont principalement générés par les centrales électriques à combustibles fossiles. Ces polluants sont responsables de nombreux problèmes de santé, notamment les maladies respiratoires et cardiovasculaires. En remplaçant les combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelable comme le solaire, on peut donc réduire ces risques pour la santé. Une étude sur les avantages climatiques et sanitaires des énergies renouvelables menée aux États-Unis a d'ailleurs démontré que l'énergie solaire et éolienne permettait d'éviter des milliers de décès prématurés grâce à la réduction de la pollution de l'air. En outre, l'augmentation de la production d'énergie solaire a permis d'éviter des millions de tonnes de CO₂, SO₂, NO_x et PM_{2.5}, réduisant ainsi les effets nocifs sur la santé publique.

2.5. L'impact socio-économique de l'énergie solaire

2.5.1. Les retombées économiques

Création d'emplois : D'après Max et al. les secteurs des énergies renouvelables et à faible émission de carbone créent plus d'emplois que les énergies fossiles. Le solaire photovoltaïque, en pleine expansion, crée une forte demande des nouvelles compétences spécialisées, se distingue particulièrement par son efficacité en matière de création d'emplois, générant davantage d'emplois par unité d'électricité produite que d'autres technologies renouvelables ^[22]. La quantité de main-d'œuvre requise pour l'installation et la fabrication des parcs solaires soutient les économies locales en mobilisant une main-d'œuvre diversifiée dans les domaines de l'installation, de l'ingénierie et de la chaîne d'approvisionnement, ce qui en fait l'un des principaux contributeurs à la croissance de l'emploi dans la transition énergétique.

Indépendance énergétique : L'énergie solaire favorise l'indépendance énergétique en permettant aux particuliers et aux communautés de produire leur propre électricité localement, réduisant ainsi leur dépendance aux sources d'énergie externes. L'installation de panneaux solaires sur les toits des habitations, des bâtiments commerciaux ou des sites industriels permet de générer une proportion substantielle de l'électricité utilisée sur place. Cette approche constitue une solution efficace pour répondre aux problèmes liés aux interruptions de service ou aux pannes généralisées du réseau électrique. De plus, elle réduit la dépendance aux investissements massifs nécessaires pour l'expansion et la modernisation des infrastructures de transmission d'électricité. En intégrant cette production décentralisée, les réseaux électriques peuvent être allégés, tout en augmentant leur résilience face à la demande croissante et aux événements imprévus.

Mesurage net : Le mesurage net est un programme qui permet de devenir producteur d'électricité par des panneaux solaires. L'énergie produite peut être utilisée pour répondre à la demande locale ou être acheminée sur le réseau principal. Hydro-Québec propose ce programme à ses clients, ce qui leur permet de réaliser des économies sur leurs coûts d'énergie et leur offre une possibilité d'avoir une source d'électricité durable et fiable ^[23].

2.5.2 L'impact socio-économique de l'énergie solaire

Dans leur étude sur les facteurs influençant l'acceptation sociale de la technologie solaire, les chercheurs Wan Nur et al. ont identifié plusieurs éléments clés qui façonnent le soutien public et l'adoption des installations solaires ^[24]. Leur recherche met en évidence que le niveau de connaissance de la technologie solaire, les coûts perçus de l'installation, les avantages attendus ainsi que les considérations environnementales influencent fortement l'acceptabilité sociale. En particulier, une meilleure compréhension de la technologie solaire et une sensibilisation accrue à ses avantages environnementaux sont positivement corrélées avec l'acceptation. À l'inverse, les inquiétudes liées aux coûts perçus ou aux impacts environnementaux potentiellement négatifs peuvent constituer des freins à l'adoption généralisée. Ces facteurs façonnent globalement la perception de la valeur et de la faisabilité de l'intégration de l'énergie solaire, en offrant une perspective nuancée sur l'interaction entre les considérations économiques, informatives et écologiques dans les attitudes publiques vis-à-vis l'énergie solaire. Comparativement à l'éolien, le solaire bénéficie d'une plus grande acceptabilité sociale grâce à son impact environnemental limité, à son abordabilité et aux progrès technologiques, qui l'ont rendu plus accessible et plus performant ^[25].

Pour continuer à promouvoir l'adoption de l'énergie solaire, il est impératif de mettre en œuvre des mesures et pratiques visant à une perspective durable. Cela nécessite une communication claire sur les avantages socio-économiques et environnementaux de cette technologie au public en tenant compte des préoccupations des communautés locales et en encourageant leur implication active dans les phases de planification et de mise en œuvre des projets solaires.

Les installations photovoltaïques devraient en priorité cibler les surfaces déjà artificialisées, telles que les toits des bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels, ainsi que les terrains inutilisés. Cette stratégie permet de maximiser l'utilisation des espaces existants tout en préservant les terres vierges et agricoles, limitant ainsi les impacts sur les écosystèmes naturels. Selon les recherches de CANMET Énergie, le potentiel énergétique des installations solaires sur toitures au Québec est estimé à environ 58 GW ^[26] démontrant leur capacité à jouer un rôle majeur dans la transition énergétique. Les installations au sol, bien qu'utiles comme complément, doivent être soigneusement planifiées pour valoriser des espaces utilisés tout en minimisant leur impact écologique et en respectant les vocations des territoires concernés.

BIBLIOGRAPHIE

1. « Le Soleil | CNES ». <https://cnes.fr/dossiers/soleil>
2. Q. M. Futura, « Histoire condensée du photovoltaïque », Futura. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/4/>
3. L.-E. Renouvelables, « Lumensol - Solaire photovoltaïque - Données techniques », Lumensol 2020. <http://www.lumensol.fr/lumensol-solaire-photovoltaïque-données-techniques.html>
4. « Effets photoélectrique et électroluminescent », Energie Plus Le Site. Consulté le: 13 novembre 2024. <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/effets-photoelectrique-et-electroluminescent/>
5. M. A. Green et al., « Solar cell efficiency tables (Version 63) », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 32, no 1, p. 3-13, 2024, doi: 10.1002/pip.3750.
6. « L'impact environnemental des panneaux solaires (guide complet) ». <https://dualsun.com/guides/panneau-solaire/impact-environnemental/>
7. « Environmental Impact Of Solar Energy | GreenMatch », GreenMatch.co.uk. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/01/impact-of-solar-energy-on-the-environment>
8. M. Akhter et al., « Sustainable Strategies for Crystalline Solar Cell Recycling: A Review on Recycling Techniques, Companies, and Environmental Impact Analysis », Sustainability, vol. 16, no 13, Art. no 13, janv. 2024, doi: 10.3390/su16135785.
9. A. SBA, « Recyclage des panneaux photovoltaïques | Technique Solaire », Technique Solaire. <https://techniquesolaire.com/avis-dexpert/le-recyclage-des-panneaux-photovoltaïques/>
10. « Solar Energy: Benefits and Drawbacks », Investopedia. <https://www.investopedia.com/articles/investing/053015/pros-and-cons-solar-energy.asp>
11. « Quels sont les impacts de l'énergie solaire sur l'environnement ? - Québec Science ». <https://www.quebecscience.qc.ca/pose-ta-colle/quels-sont-les-impacts-de-energie-solaire-sur-environnement/>
12. D. Arvizu et al., « Direct Solar Energy », dans Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 1re éd., O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. Von Stechow, et P. Matschoss, Éd., Cambridge University Press, 2011, p. 333-400. doi: 10.1017/CBO9781139151153.007.
13. « Reflectivity-of-Solar-Electric-PV-Modules.pdf.pdf ». <https://www.solarchoice.net.au/wp-content/uploads/Reflectivity-of-Solar-Electric-PV-Modules.pdf.pdf>
14. « Whitepaper-Evaluating-the-Field-of-View-07December2021.pdf ». <https://www.pagerpower.com/wp-content/uploads/2021/12/Whitepaper-Evaluating-the-Field-of-View-07December2021.pdf>
15. E. Riley et S. Olson, « A Study of the Hazardous Glare Potential to Aviators from Utility-Scale Flat-Plate Photovoltaic Systems », International Scholarly Research Notices, vol. 2011, no 1, p. 651857, 2011, doi: 10.5402/2011/651857.
16. Y. He, D. J. C. Hii, et N. H. Wong, « Solar photovoltaics deployment impact on urban temperature: Review and assessment recommendations », Building and Environment, vol. 264, p. 111920, oct. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111920.
17. « Cool roofs boost the energy production of photovoltaics: Investigating the impact of roof albedo on the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic modules - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23005819>
18. « Environmental Impacts of Solar Power | Union of Concerned Scientists ». <https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-solar-power>
19. « Fact Sheet: Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV Systems », IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS), 2024. doi: 10.69766/ALGS2169.
20. « Solar honey | Lightsource bp US ». Consulté le: 13 novembre 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://lightsourcebp.com/us/responsible-solar/environnement/agrivoltaics/solar-honey/>
21. « Climate and air quality benefits of wind and solar generation in the United States from 2019 to 2022 - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949790624001654>
22. M. Wei, S. Patadia, et D. M. Kammen, « Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? », Energy Policy, vol. 38, no 2, p. 919-931, févr. 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.044.
23. « Option I de mesurage net pour autoproducteur | Hydro-Québec ». <https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/tarifs/option-de-mesurage-net-option-i.html>
24. « 2632.pdf ». <https://excelingtech.co.uk/ojs/index.php/IJSCM/article/viewFile/5192/2632>
25. « Filière d'énergie renouvelable. L'énergie solaire photovoltaïque ».
26. E. Gaucher-Loksts et S. Pelland, « Assessing the photovoltaic potential of the Canadian building stock ».

Pour toute question, communiquez avec notre équipe dédiée :
unispourleclimat@umq.qc.ca

