

FILIÈRE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE PROFONDE



 Hydro
Québec

L'ÉNERGIE DE LA TERRE



ÉNERGIE

GÉOTHERMIQUE

PROFONDE :

ÉNERGIE THERMIQUE

RÉCUPÉRÉE À PARTIR

DE LA VAPEUR, DE

L'EAU LIQUIDE OU DE

ROCHES CHAUDES

STOCKÉES DANS LES

COUCHES PROFONDES

DE LA TERRE. ELLE

SERT PRINCIPALEMENT

À PRODUIRE DE

L'ÉLECTRICITÉ AU MOYEN

D'UNE TURBINE.

ÉTAT DE LA SITUATION

Aujourd'hui, plus de 50 pays (États-Unis, Islande, Mexique, etc.) utilisent l'énergie géothermique profonde sous forme de vapeur ou d'eau surchauffée pour produire de l'électricité. En 2015, la puissance installée mondiale était de 12,6 GW avec une production d'énergie de 73,5 TWh.

La filière de la géothermie profonde est en développement partout sur la planète. En 2020, la puissance installée mondiale devrait atteindre 21,4 GW (investissements publics et privés). Il existe dans le monde différents [types de technologies](#), mais il reste à relever plusieurs [défis techniques](#).

Au Canada, le bassin sédimentaire de l'Ouest canadien fait l'objet d'une attention particulière pour son potentiel d'énergie géothermique. En Colombie-Britannique (Meager Creek), dans les Territoires du Nord-Ouest (Fort Liard) et en Saskatchewan (Estevan, projet DEEP), les projets de géothermie hydrothermale – l'exploitation de la chaleur de l'eau chaude présente naturelle-



En couverture : Centrale géothermique d'Olkaria II, Kenya.

Ci-contre : Centrale géothermique et station thermique du Lagon bleu, Islande.

ment dans le sous-sol – sont rendus à l'étape de l'étude technico-économique. En Alberta, une analyse du potentiel de géothermie profonde a été menée. En 2016, le pays ne possédait encore aucune centrale géothermique.

Dans l'est du Canada, les progrès technologiques des dernières années en matière de forage pour accéder aux fluides géothermaux, de création et de gestion de réservoirs géothermiques à plusieurs kilomètres sous terre, etc. laissent présager une exploitation à moyen ou à long terme de l'énergie thermique à de très grandes profondeurs.

Au Québec, le potentiel de la géothermie profonde à partir de la roche chaude a été évalué. Toutefois, aucun projet de prospection, de démonstration ou d'exploitation industrielle n'est prévu à moyen ou à long terme.

POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE PROFONDE

Les États-Unis sont les premiers du monde pour la production d'électricité à partir de la vapeur géothermique. En 2015, leur puissance installée était de 3,45 GW et leur production d'énergie, de 16,6 TWh. En 2020, leur puissance installée pourrait s'élever à 5,6 GW.

Dans l'est des États-Unis, le potentiel de production d'énergie électrique à partir de roches chaudes profondes est estimé à 500 GW, soit l'équivalent du total de la puissance installée actuelle du pays.

Note : Il n'est pas question ici de la géothermie de surface utilisée pour chauffer et climatiser des bâtiments.

POUR EN SAVOIR D'AVANTAGE

- [Types de technologies](#)
- [Défis techniques](#)
- [Potentiel géothermique du Québec](#)
- [Cycles de puissance](#)
- [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](#)

Au Québec, l'environnement géologique est constitué de formations rocheuses pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres de profondeur. Dans le sud-est du Québec, des centrales géothermiques pourraient être alimentées par des réservoirs situés à plus de 6 ou 7 km sous terre sur une superficie couvrant de 10 à 15 % du territoire. Les [températures des réservoirs](#) avoisineraient les 150 °C, et la puissance installée pourrait être de 2 à 5 MW par site de production.

RENDEMENT ET COÛTS

Les coûts d'investissement d'une centrale géothermique du type SGS (système géothermique stimulé), y compris le forage et la stimulation hydraulique, s'élèveraient à au moins 10 000 \$/kW. Et le coût de l'électricité produite varierait entre 22 ¢ et 32 ¢/kWh, voire davantage.

Une fois la technologie rendue à maturité, les coûts d'investissement seraient d'au moins 6 000 \$/kW. Et le coût de l'électricité produite varierait entre 10 ¢ et 15 ¢/kWh, voire davantage.

Le rendement de conversion énergétique est de l'ordre de 10 à 15 %, selon la température du fluide géothermal et le cycle thermodynamique de conversion de chaleur en électricité ([cycle de puissance](#)) employé. Cependant, à moyen et à long terme, en utilisant de nouveaux fluides géothermaux et des cycles de puissance plus performants, il pourrait atteindre et même dépasser les 25 %.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

- Installation de centrales géothermiques SGS possible en tout lieu, à la condition de creuser assez profondément pour atteindre les températures désirées.
- La centrale se trouvant directement au-dessus de la source de chaleur, aucun besoin de transformation ou de transport de carburant. Notamment, les déversements accidentels de pétrole sont éliminés.

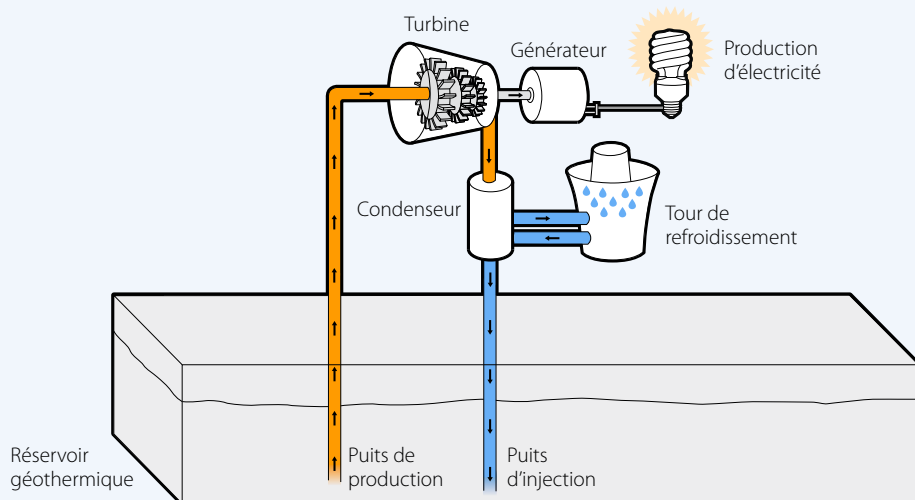
- Production prévisible et continue. Facteur d'utilisation de plus de 95 %: supérieur à ceux des filières solaire photovoltaïque et éolienne par exemple, et comparable à ceux de plusieurs centrales nucléaires. Ne nécessite pas de système de stockage d'énergie.
- Aucun traitement particulier de la source d'énergie, comme le raffinage du pétrole ou l'enrichissement de l'uranium.
- À moyen terme, exploitation d'une centrale SGS peu rentable dans de nombreuses régions.
- Ressource renouvelable: chaleur extraite d'un réservoir géothermique qui est réalimenté de façon naturelle.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

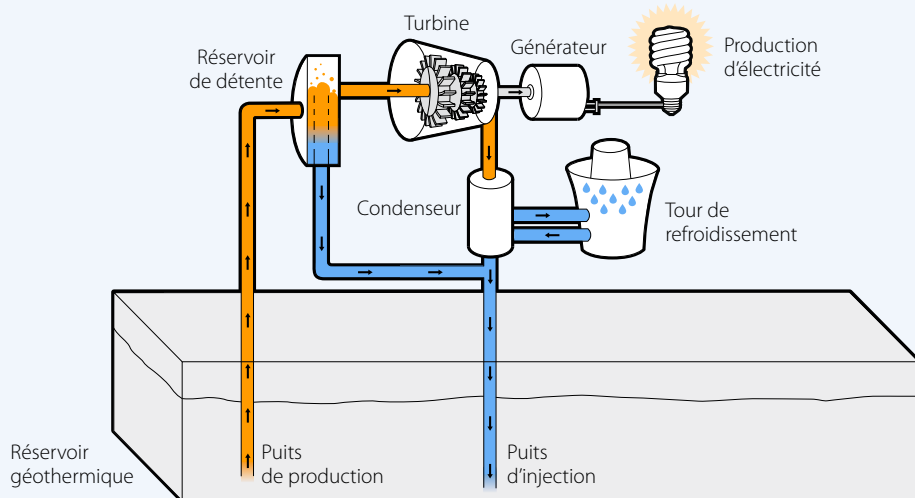
- Système au sol requérant peu d'espace.
- Peu d'émissions de gaz à effet de serre et de contaminants atmosphériques lors de l'exploitation pour la très grande majorité des centrales géothermiques.
- Faible empreinte environnementale tout au long du cycle de vie, notamment pour les centrales SGS.
- Évitement de la contamination de l'eau souterraine ou de l'eau de surface par une bonne gestion des eaux résiduelles lors des forages et des opérations de stimulation hydraulique.
- Utilisation problématique de l'eau dans les régions disposant de peu de ressources en eau.
- Inquiétudes en ce qui concerne l'effet de microséismes.

UNE RESSOURCE DURABLE

CENTRALE GÉOTHERMIQUE À VAPEUR SÈCHE



CENTRALE GÉOTHERMIQUE À VAPEUR HUMIDE



Types de technologies

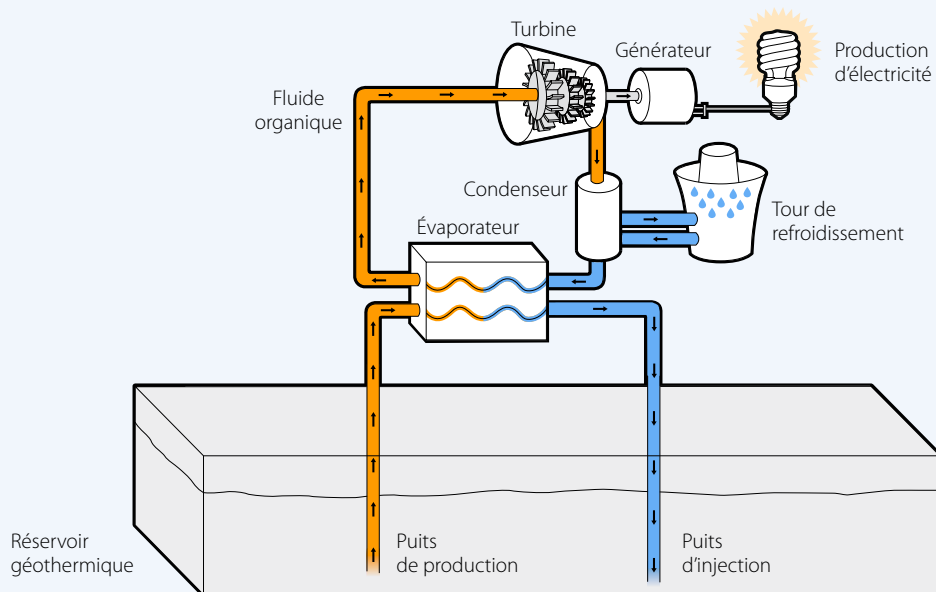
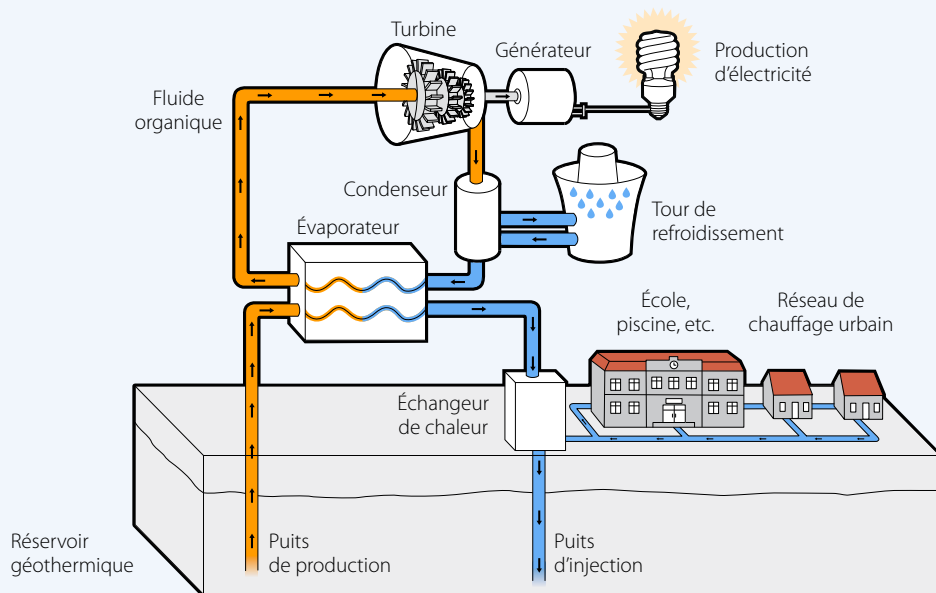
Il existe plusieurs types de centrales géothermiques.

Centrale géothermique à vapeur sèche

Le fluide géothermique se présente sous forme de vapeur sèche pressurisée et surchauffée à une température pouvant aller de 180 à plus de 350 °C. Il fait tourner la turbine d'une centrale fonctionnant selon le cycle de Rankine, tandis que l'eau refroidie résultante est injectée dans le réservoir géothermique.

Centrale géothermique à vapeur humide

Le fluide géothermique se présente sous forme de vapeur humide (mélange d'eau et de vapeur) pressurisée à une température supérieure à 180 °C. La vapeur saturée sèche, séparée de la vapeur humide dans un ou deux réservoirs de détente, fait tourner la turbine d'une centrale fonctionnant selon le cycle de Rankine. L'eau refroidie résultante est injectée dans le réservoir géothermique. Il s'agit d'une centrale géothermique à simple ou double détente.

CENTRALE GÉOTHERMIQUE HYDROTHERMALE**CENTRALE DE GÉOTHERMIE PROFONDE STIMULÉE SGS****Centrale géothermique hydrothermale**

Le fluide géothermal se présente sous forme d'eau chaude pressurisée à une température pouvant aller de 125 à 180 °C. Pour convertir efficacement en électricité la chaleur récupérée à ce niveau de température, il faut que la centrale géothermique soit à cycle binaire.

Centrale de géothermie profonde stimulée SGS¹

Le fluide géothermal se présente sous forme de liquide réchauffé au contact de roches chaudes à une température supérieure à 150 °C. Pour accéder à l'énergie thermique des roches chaudes, il faut procéder par fracturation hydraulique, soit créer des fissures dans la roche par injection d'eau sous haute pression, afin de permettre au fluide de circuler dans le réservoir géothermique. Une partie du fluide géothermal pourrait être utilisée comme source de chaleur dans des systèmes géothermiques de chauffage urbain ou industriel.

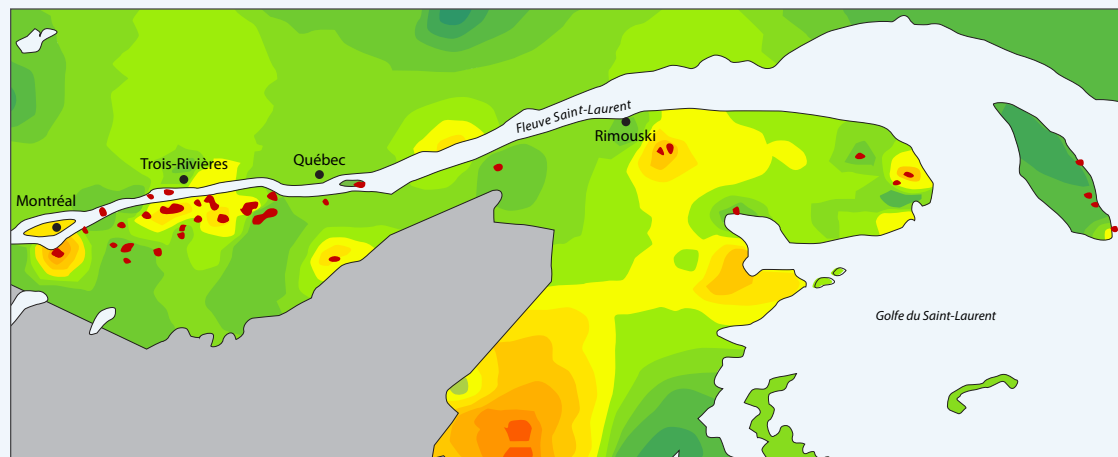
Défis techniques

Les défis techniques à long terme sont nombreux: élaborer des méthodes de prospection avancées et efficaces; réduire les coûts de forage à grandes profondeurs; maîtriser, à partir de la surface, la création et l'exploitation des réservoirs géothermiques profonds; améliorer la conversion de chaleur en électricité en utilisant de nouveaux cycles thermodynamiques et de nouveaux fluides caloporteurs (par exemple, CO₂, N₂). Il faudra faire les investissements adéquats en recherche-développement et concevoir des modèles de financement diversifiés à risque minimal.

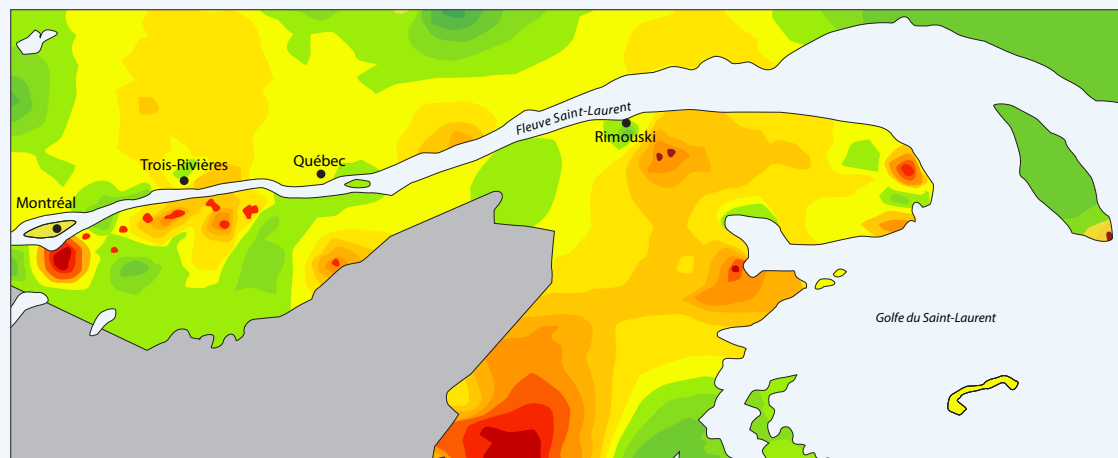
1. SGS pour système géothermique stimulé – en anglais, EGS pour Engineered Geothermal System ou Enhanced Geothermal System.

Potentiel géothermique du Québec

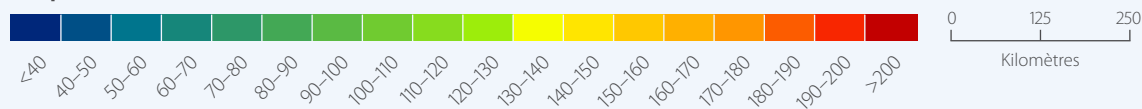
TEMPÉRATURES DES RÉSERVOIRS À 6 KM DE PROFONDEUR



TEMPÉRATURES DES RÉSERVOIRS À 7 KM DE PROFONDEUR



Température (°C)



Cycles de puissance

Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine utilise comme fluide de travail une vapeur sèche à une température supérieure à 180 °C provenant d'un réservoir géothermique ou obtenue après séparation de la vapeur humide par détente simple ou double.

Cycles binaires

> Cycle organique de Rankine

Le cycle organique de Rankine, une variante du cycle de Rankine, utilise comme fluide de travail un fluide organique (par exemple, un hydrofluorocarbure), dont le point d'ébullition est faible. Celui-ci se vaporise grâce à la chaleur de l'eau de source géothermique, à une température inférieure à 180 °C.

> Cycle de Kalina

Le cycle de Kalina, similaire au cycle organique de Rankine, utilise comme fluide de travail un mélange de deux fluides (par exemple, ammoniac et eau). Résultat, les processus d'évaporation et de condensation ont lieu à des températures variables, ce qui augmente l'efficacité de la conversion de chaleur en électricité par rapport aux cycles de Rankine classique et organique.

Changements climatiques et qualité de l'air

Pour la filière de la géothermie profonde, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de contaminants atmosphériques, associées aux substances contenues dans les fluides géothermaux, varient selon les conditions naturelles des sites de production. Les gaz émis les plus courants sont le CO₂ et le H₂S. Lorsqu'il y a présence de H₂S, un système d'épuration d'air est normalement utilisé pour réduire cette substance au minimum. Habituellement, les émissions de GES sont très faibles. Dans de rares cas, elles peuvent être aussi importantes que celles des centrales thermiques alimentées par des combustibles fossiles. En exploitation, les centrales de géothermie profonde ne génèrent pas d'émissions.

Analyse du cycle de vie

Sur la base du cycle de vie, les principaux impacts environnementaux de la filière de la géothermie profonde (centrales SGS à cycle binaire) seraient similaires à ceux des autres filières d'énergie renouvelable. Les matériaux utilisés, la fabrication et le transport des équipements sont les éléments qui comptent le plus dans l'analyse du cycle de vie, de même que le type de machinerie utilisé pour le forage ainsi que le nombre et la profondeur des puits de production et d'injection creusés.

Par contre, les centrales de géothermie profonde ont des conditions d'exploitation très différentes les unes des autres. Il est difficile d'en tirer des généralités. Dans de rares cas, elles peuvent présenter, quant à l'indicateur Changements climatiques, des résultats similaires à ceux des centrales thermiques alimentées par des combustibles fossiles.

Écosystèmes et biodiversité

Certains sites d'exploration abritent des espèces endémiques. Il faut évaluer l'impact sur ces espèces avant de réaliser un projet de géothermie profonde.

Des produits chimiques sont ajoutés à l'eau injectée dans les puits, circulant en circuit fermé, ce qui limite les possibilités de contamination des écosystèmes. Il faut cependant prendre les précautions nécessaires pour éviter de contaminer l'eau souterraine ou l'eau de surface.

La chaleur résiduelle de la centrale est normalement dissipée dans des tours de refroidissement. Sinon, elle prend la forme de rejets thermiques qui sont déversés dans les cours d'eau avoisinants. Pour atténuer l'impact environnemental, la conception de la centrale devrait intégrer les caractéristiques du site et tenir compte de la présence des espèces animales.

Santé et qualité de vie

Les bruits de fonctionnement d'une centrale de géothermie profonde sont similaires à ceux des autres types de centrales électriques. Les plus importants sont générés à l'étape du forage des puits de production et d'injection. Au besoin, des mesures d'atténuation peuvent être mises en place.

La présence d'une centrale géothermique, par la vue de son panache de vapeur, a un impact visuel certain sur le paysage. Pour l'intégrer de façon harmonieuse dans le milieu, il faut assortir les couleurs de ses équipements de surface à celles de l'environnement.

Le forage de puits et la réalisation de fracturations hydrauliques nécessitent des quantités d'eau qui varient selon les sites d'exploitation. L'impact devient substantiel dans les régions disposant de peu de ressources en eau.

Aménagement du territoire

Une centrale de géothermie profonde occupe au sol peu d'espace par rapport à d'autres types de centrales électriques, la majorité de ses équipements étant souterrains. Ce sont les étangs aménagés pour la collecte des eaux résiduelles qui peuvent prendre plus d'espace. La présence d'équipements en surface n'empêche pas les activités agricoles en parallèle. Les tours de refroidissement ne consomment pas d'eau, mais nécessitent une plus grande surface.

Sur certains sites, il s'est déjà produit un affaissement du sol dû à un prélèvement de quantités d'eau à un rythme supérieur au taux d'alimentation naturelle. Aujourd'hui, les nouveaux sites de production sont mieux évalués et, pour contrer ce phénomène, les eaux géothermales sont réinjectées dans le système – une pratique courante.

La fracturation hydraulique peut induire une sismicité accrue (microséismes), indétectable, soit moins de 3 sur l'échelle de Richter. Ce phénomène est quelquefois observé lors d'une fracturation hydraulique employée pour faciliter l'extraction de gaz naturel ou de pétrole. Plusieurs centrales géothermiques étant situées dans des zones sismiques, il est parfois difficile de différencier les séismes induits des séismes naturels.

Économie régionale

Par le passé, l'exploitation de centrales géothermiques a entraîné à certains endroits la destruction de phénomènes naturels comme des geysers, des sources d'eau chaude et des mares de boue, ce qui a probablement nui aux activités touristiques locales. Aujourd'hui, les études approfondies des nouveaux projets proposent des solutions pour éliminer cet impact environnemental.

Une utilisation polyvalente des sites de production pourrait améliorer l'économie régionale. Dans certains projets, les eaux géothermales, au lieu d'être réinjectées dans les réservoirs, pourraient servir à créer des habitats fauniques ou à favoriser le tourisme littoral (comme le Lagon bleu, une station thermale en Islande). La chaleur résiduelle des centrales géothermiques pourrait encourager l'implantation d'autres industries, telles que les serres agricoles.

Acceptabilité sociale

Tout projet de production d'électricité requiert une consultation de la population. Une utilisation polyvalente (tourisme, agriculture, etc.) des sites de production géothermique pourrait favoriser l'acceptabilité sociale des projets.

Selon le sondage 2013 de Léger Marketing, la géothermie profonde en tant que filière d'énergie renouvelable reçoit l'assentiment de la majorité de la population québécoise.

RÉFÉRENCES

1. Bayer, B., Rybach, L., Blum, P., Brauchler, R. 2013. **Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, p. 446-463.
2. Bertani, R. **Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report.** Proceedings of the World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. (En ligne). 2015. <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01001.pdf>. Document consulté le 2 décembre 2016.
3. Bouchard, V. **Projet géothermique à Fort Liard.** (En ligne). 2012. <http://www.aquilon.nt.ca/article/Une-premiere-au-Canada-201206281501/default.aspx>. Page consultée le 2 décembre 2016.
4. Delony, J. 2016. **Outlook: Future of Geothermal Industry Becoming Clearer.** (En ligne). 2016. <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2016/01/2016-outlook-future-of-geothermal-industry-becoming-clearer.html>. Page consultée le 2 décembre 2016.
5. DiPippo, R. **Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact Third Edition.** (En ligne). 2012. https://www.u-cursos.cl/usuario/c658fb0e38744551c1c51c640649db2e/mi_blog/r/Geothermal_Power_Plants.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
6. Geothermal Energy Association. **A Guide to Geothermal Energy and the Environment.** (En ligne). 2007. <http://geo-energy.org/reports/environmental%20guide.pdf>. Document consulté le 2 décembre 2016.
7. Glassley, W. E. **Geothermal Energy Renewable Energy and the Environment Second Edition.** (En ligne). 2014. <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/b17521>. Document consulté le 2 décembre 2016.
8. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. **Sources d'énergie renouvelable et atténuation du changement climatique.** (En ligne). 2011. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_fr.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
9. Jessop, A. M., Ghomeshei, M. M., Drury, M. 1991. **Geothermal Energy in Canada.** *Geothermics*, vol. 20, p. 369-385.
10. Majorowicz, J., Minea, V. 2012. **Geothermal Energy Potential in the St-Lawrence River Area, Québec.** *Geothermics*, vol. 43, p. 25-36.
11. Majorowicz, J. A., Garven, G., Jessop, A., Jessop, C. 1999. **Present heat flow along a profile across the Western Canada Sedimentary Basin: the extent of hydrodynamic influence.** Dans Foester, A., Merriam, D. (Ed.) **Geothermics in Basin Analysis. Computer Applications in the Earth Sciences.** Kluwer Academic/Plenum Publishers. p. 61-80.
12. Majorowicz, J. A., Moore, M. **Enhanced Geothermal Systems (EGS) Potential in the Alberta Basin.** (En ligne). 2008. http://www.cangea.ca/uploads/3/0/9/7/30973335/albertaegspotentialreport_s.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
13. Massachusetts Institute of Technology. **The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century.** (En ligne). 2006. https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
14. **Meager Creek Geothermal project.** (En ligne). 2016. <http://www.electricityforum.com/news/mar04/meager.html>. Page consultée le 2 décembre 2016.
15. Menberg, K., Pfister, S., Blum, P., Bayer, P. 2016. **A matter of meters: state of the art in the life cycle assessment of enhanced geothermal systems.** *Energy and Environmental Science*, vol. 9, p. 2720-2743.
16. **Project Development Strategy Estevan/DEEP.** (En ligne). 2016. <http://www.deepcorp.ca/project-development-strategy/>. Page consultée le 2 décembre 2016.
17. Ressources naturelles Canada, **Geothermal Energy Resource Potential of Canada.** (En ligne). 2012. http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/rncan-nrcan/M183-2-6914-eng.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.