

FILIÈRE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE PROFONDE



Q *Hydro
Québec*

L'ÉNERGIE DE LA TERRE



**QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE
GÉOTHERMIQUE
PROFONDE ?**

**C'EST LA CHALEUR
RÉCUPÉRÉE À PARTIR
DE L'EAU CONTENUE
NATURELLEMENT
OU INJECTÉE DANS
UN RÉSERVOIR
GÉOTHERMIQUE SE
TROUVANT À DES
MILLIERS DE MÈTRES DE
PROFONDEUR SOUS LA
SURFACE DE LA TERRE.**

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

Ci-contre: Vue aérienne d'une centrale géothermique, Nouvelle-Zélande.

Il ne faut pas confondre la géothermie profonde avec la géothermie de surface:

- La géothermie profonde vise à récupérer la chaleur du sous-sol à de grandes profondeurs, soit jusqu'à 5 000 m environ, pour un usage direct, pour la production d'électricité au moyen d'une turbine ou pour une combinaison des deux par cogénération. L'extraction de la chaleur dans les couches profondes de la Terre se fait à partir d'un système géothermique.
- La géothermie de surface vise à valoriser la chaleur du sous-sol peu profond, soit jusqu'à environ 400 m, pour le chauffage et la climatisation de bâtiments. Il faut notamment utiliser une pompe à chaleur pour transporter et réchauffer cette énergie de façon à ce qu'elle soit compatible avec le circuit de chauffage du bâtiment.



SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES

À l'heure actuelle, il est possible d'exploiter la chaleur accumulée dans des formations rocheuses du sous-sol par des forages de 1 000 à 3 000 m de profondeur, voire de 5 000 m, à partir de l'un ou l'autre des systèmes géothermiques suivants:

- Le système géothermique hydrothermal, ou système hydrothermal traditionnel, consiste à exploiter la chaleur de l'eau chaude ou de la vapeur qui se trouve naturellement dans une formation rocheuse perméable, c'est-à-dire qui laisse passer l'eau par ses pores (ex.: calcaire) ou ses fissures (ex.: granite). C'est le système privilégié lorsque tous les éléments nécessaires à l'exploitation du réservoir géothermique sont réunis (température élevée, fluide et roche perméable).
- Le système géothermique stimulé (SGS, ou EGS en anglais, pour enhanced geothermal system), ou système à roches fracturées, consiste à créer un réservoir géothermique par fracturation hydraulique. Ce procédé vise à provoquer des fissures dans la formation rocheuse par l'injection d'eau à haute pression. Une fois le réservoir géothermique créé, on fait descendre l'eau dans un puits d'injection, on la laisse circuler dans les fissures pour qu'elle se réchauffe, puis on la récupère à partir d'un puits de production. Elle peut alors être utilisée comme source de chaleur pour alimenter une turbine, par exemple. C'est la solution trouvée pour exploiter les formations rocheuses qui sont peu ou pas perméables.

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

Le choix du système dépend des caractéristiques du site d'exploitation. Cependant, comme on sait aujourd'hui que la plupart des formations rocheuses du sous-sol de la Terre sont peu ou pas perméables, mais que leur potentiel est énorme, le développement du SGS s'est accéléré depuis quelques années. On peut injecter de l'eau s'il manque de fluide et améliorer la perméabilité des roches. En augmentant la profondeur des forages, il est même devenu possible d'atteindre les températures nécessaires pour valoriser la ressource en dehors des zones thermiques les plus favorables (régions géologiquement actives à la frontière des plaques tectoniques), ce qui veut dire presque n'importe où. La réalisation de projets de SGS reste toutefois marginale, car, bien que ce système semble simple en apparence, il est assez complexe à mettre au point et très coûteux. De plus, la puissance électrique que l'on peut obtenir à partir des SGS est très faible par rapport à celle qu'offrent des systèmes hydrothermaux. À titre de comparaison, la capacité de production de la centrale de Reykjanes, en Islande, s'élève à 100 MW, alors que celle de la centrale de Soultz-sous-Forêt, en France, n'atteint que 1,4 MW. La première est alimentée par un système géothermique hydrothermal, et la seconde, par un SGS.

Au cours des dernières années, les techniques de forage pour accéder aux fluides géothermaux se sont perfectionnées. Il en est de même pour la création et la gestion de réservoirs géothermiques à plusieurs kilomètres sous terre. S'il est vrai que la filière de la géothermie profonde a progressé à grands pas, il lui reste plusieurs [défis techniques](#) à relever.

ÉTAT DE LA SITUATION

Bien qu'elle soit souvent moins connue que d'autres filières d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le solaire, la géothermie profonde est en développement partout sur la planète. En 2020, la puissance installée liée à cette énergie s'élevait à 30 GW pour la production de chaleur (Lund et Toth, 2020) et à 16 GW pour la production d'électricité (Huttrer, 2020) à l'échelle mondiale.

Le premier pays producteur d'électricité issue de la géothermie profonde, ce sont les États-Unis. En 2020, leur puissance installée pour cette énergie était de 3,7 GW et elle pourrait atteindre 4,3 GW en 2025. Toujours en 2020, ce sont 18,4 TWh qui ont été produits aux États-Unis par des systèmes géothermiques hydrothermaux. Une cinquantaine d'autres pays utilisent l'énergie géothermique profonde pour produire de l'électricité. L'Indonésie, les Philippines, la Nouvelle-Zélande, l'Islande, le Mexique et la Turquie en sont des exemples. À l'échelle mondiale, 95,1 TWh ont été produits en 2020 à partir de systèmes géothermiques, dont la très grande majorité sont hydrothermaux.

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) et dans les Territoires du Nord-Ouest (Fort Liard), les projets d'exploitation de systèmes hydrothermaux sont rendus à l'étape de l'étude technicoéconomique. En Alberta, une analyse du potentiel de la géothermie profonde a été menée tandis qu'en Saskatchewan, le projet DEEP – Deep Earth Energy Production – a franchi une nouvelle étape : on a procédé au forage des puits en 2020. Ainsi, le Canada devrait avoir, en 2021, une première centrale géothermique à cycle binaire qui exploite un système hydrothermal.

Dans l'est du Canada et notamment au Québec, il n'existe pas de centrale géothermique et, bien que des travaux ont été effectués pour évaluer le potentiel de la géothermie, aucun projet de prospection, de démonstration ou d'exploitation industrielle n'est prévu.

POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE PROFONDE

Selon le Conseil mondial de l'énergie (2013), le potentiel mondial de production d'électricité à partir de systèmes hydrothermaux pourraient aller jusqu'à 140 GW. Pour ce qui est des systèmes stimulés, le potentiel théorique serait énorme, mais le potentiel exploitable, beaucoup moins grand. À titre d'exemple, aux États-Unis, le potentiel des réservoirs hydrothermaux destinés à la production d'électricité qui n'ont pas encore été découverts est estimé à 30 GW. Quant au potentiel théorique de production d'énergie électrique à partir de systèmes stimulés dans les roches de plus de 150 °C situées entre 3 km et 7 km de profondeur, il est immense. Il est estimé à plus de 5 000 GW, ce qui surpassé la puissance totale installée du pays à l'heure actuelle. La majorité de ce potentiel est dans l'ouest des États-Unis, où le sous-sol est plus chaud. En pratique, toutefois, une faible partie pourra être exploitée en raison des contraintes économiques, techniques et socioenvironnementales.

Au Québec, le potentiel de la géothermie profonde a été évalué en 2016 (Richard et coll., 2017). Le sous-sol de la province ne contient aucun réservoir hydrothermal suffisamment chaud pour la production de chaleur ou d'électricité. Dans les basses-terres du Saint-Laurent, des centrales pourraient être alimentées

par des réservoirs géothermiques stimulés. Or, pour atteindre les roches de 150 °C, il faut descendre à plus de 5 km, voire 8 km à certains endroits. De plus, selon les dernières estimations basées sur les formations rocheuses atteignant 120 °C et de 3 km à 10 km de profondeur, le potentiel théorique des basses-terres du Saint-Laurent ne serait que de 45 GW (Bedard et coll., 2020). Dans ces conditions et à ces températures, la puissance installée d'une centrale alimentée par des réservoirs géothermiques à 6 km de profondeur serait, au mieux, de 2 MW (Richard, 2016).

RENDEMENT ET COÛTS

Comme pour tous les systèmes de conversion d'énergie thermique en énergie électrique, le rendement énergétique varie principalement selon la température de la source de chaleur, soit le fluide géothermal. Lorsque la température de celui-ci oscille entre 150 °C et 200 °C une fois à la surface, le rendement énergétique se situe actuellement entre 10 % et 15 %. Cependant, à moyen et à long terme, si l'on atteint des températures plus élevées et si l'on utilise de nouveaux fluides géothermaux et des cycles de puissance plus performants, le rendement énergétique pourrait atteindre, voire dépasser 25 %.



Centrale géothermique et station thermale du Lagon bleu, Islande.

En 2019, les coûts moyens d'investissement d'une centrale géothermique produisant de l'électricité à partir d'un système hydrothermal s'élevaient à environ 4 000 \$ US/kW et le coût de l'énergie, à environ 0,07 \$ US/kWh (IRENA, 2020). Plus la température du fluide géothermal est basse, plus le coût de l'électricité est élevé.

Selon le National Renewable Energy Laboratory, aux États-Unis, les coûts liés à une centrale qui produit de l'électricité à partir d'un système géothermique stimulé (SGS) sont les suivants :

- Pour les formations rocheuses peu profondes (1 km-3 km) se situant près des sources hydrothermales et atteignant une température élevée (200 °C), le coût de la centrale est d'environ 15 000 \$ US/kW et celui de l'électricité se situe entre 0,25 \$ US/kW et 0,30 \$ US/kWh.
- Pour les formations rocheuses plus profondes (3-6 km) mais moins chaudes (150 °C-200 °C), l'installation de la centrale coûte 60 000 \$ US/kW et l'électricité qu'elle produit, plus de 0,60 \$ US/kWh.

Dans un environnement géologique comme celui du Québec, les coûts d'investissement d'une centrale géothermique avec un SGS se chiffraient à plus de 65 000 \$ US, et le coût de l'électricité, à au moins 75 ¢ US/kWh. L'essentiel des coûts est lié au forage des puits profonds. Par ailleurs, beaucoup d'incertitude entoure l'exploitation des réservoirs stimulés, car leur performance dépend de leurs caractéristiques et du réseau de fractures résultant de la fracturation hydraulique. Cette incertitude se reflète de façon importante sur la capacité de production du système et donc des coûts par unité d'énergie (Richard, 2016). En revanche, une fois la technologie rendue à maturité, les coûts de la géothermie profonde pourraient baisser fortement.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

- Potentiel de sites d'installation illimité, à la condition de creuser assez profondément pour atteindre la gamme de températures nécessaire à la production de chaleur et d'énergie.
- Production prévisible et continue.
- Système de stockage d'énergie non nécessaire.
- Aucun traitement particulier de la source d'énergie, comme le raffinage du pétrole ou l'enrichissement de l'uranium.
- Aucun besoin de transformation ni de transport de carburant lorsque la centrale se trouve directement au-dessus de la source de chaleur (élimination des déversements accidentels de pétrole, par exemple).
- Exploitation d'une centrale avec un SGS peu rentable dans de nombreuses régions.
- Filière reposant sur le développement d'un système géothermique à une forte profondeur qui demande un investissement important et qui comporte un risque élevé de non-performance.



POUR EN SAVOIR DAVANTAGE

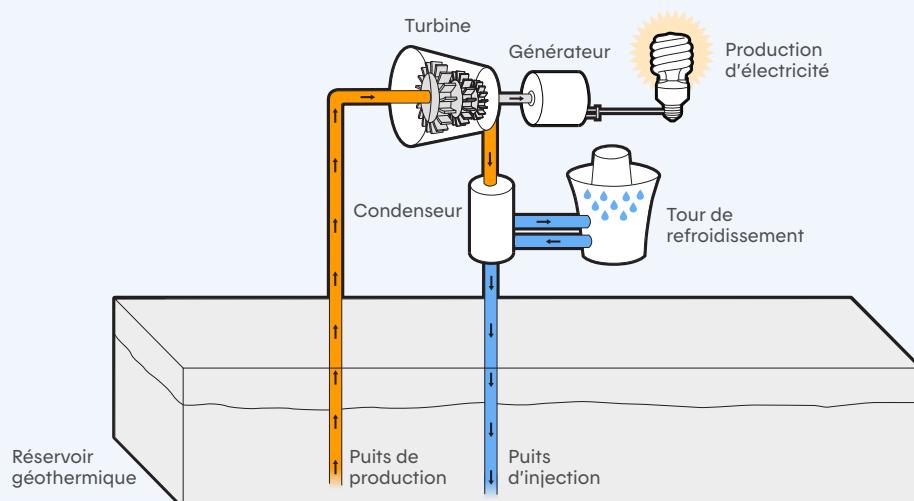
- Types de technologies
- Potentiel géothermique du Québec
- Défis techniques
- Changements climatiques et qualité de l'air
- Analyse du cycle de vie
- Écosystèmes et biodiversité
- Santé et qualité de vie
- Aménagement du territoire
- Économie régionale
- Acceptabilité sociale

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.
- 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 fracturations hydrauliques.
- Utilisation problématique de grandes quantités d'eau, surtout dans les régions où cette ressource est limitée.
- Inquiétudes liées à l'effet de microséismes.
- Risque d'accroître la séismicité lors de l'exploitation de systèmes géothermiques stimulés.
- Impacts potentiels sur l'environnement et sur la santé selon la technique de forage utilisée pour la fracturation hydraulique.
- Mesures d'atténuation nécessaires si le réservoir stimulé contient naturellement des minéraux radioactifs, car ils pourraient se retrouver dans le fluide géothermal et se déposer dans certains équipements de la centrale en surface.
- Impact sur le paysage: les pipelines, les tours de refroidissement, les bassins d'entreposage, le bâtiment et les lignes de transport sont des infrastructures imposantes qui peuvent être visibles de loin.
- Perte de végétation et de faune lors de la construction de la centrale en raison du déboisement.

UNE RESSOURCE DURABLE

CENTRALE GÉOTHERMIQUE À VAPEUR SÈCHE



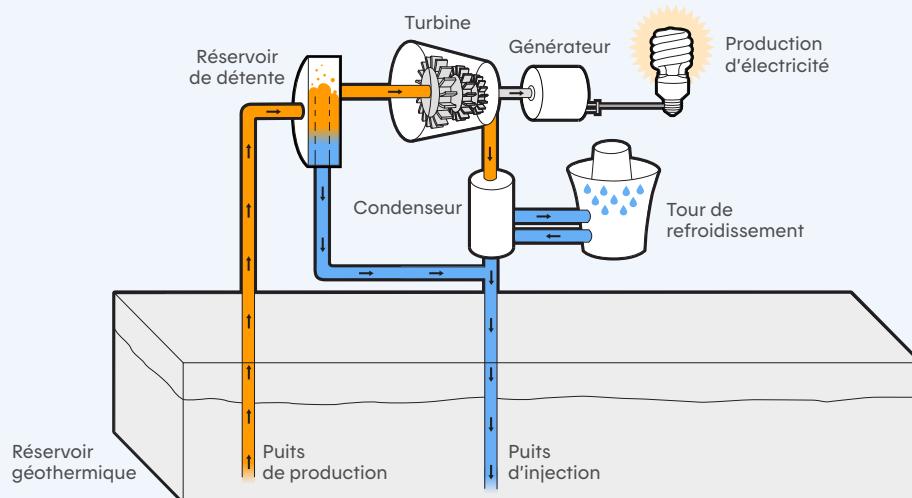
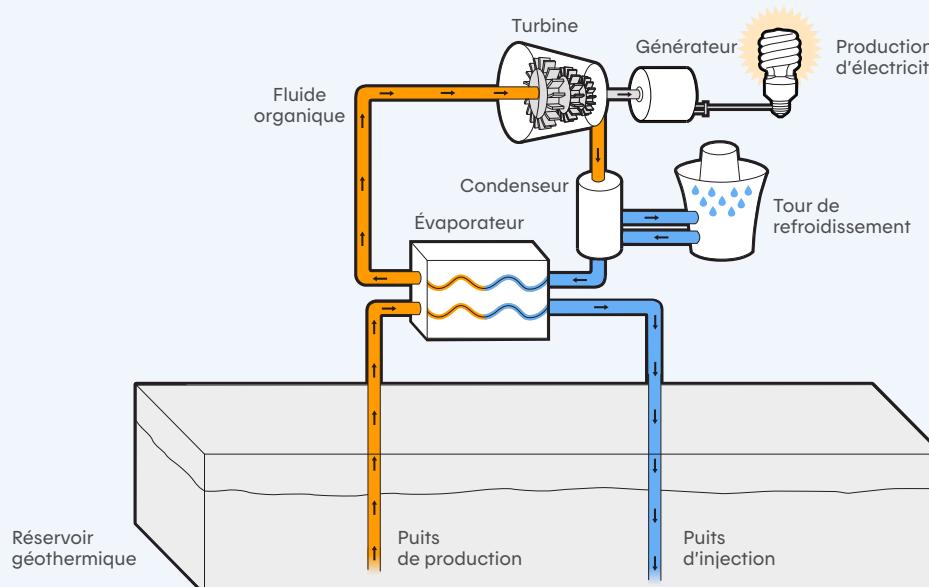
Types de technologies

Il existe différentes technologies pour transformer la chaleur issue de la géothermie profonde en énergie électrique. Le choix de la technologie dépend essentiellement de la forme (vapeur, liquide ou une combinaison des deux) et de la température du fluide géothermal (de 125 °C à 350 °C environ). Ainsi, on distingue principalement trois types de centrales :

- les centrales géothermiques à vapeur sèche ;
- les centrales géothermiques à vapeur humide ;
- les centrales géothermiques à cycle binaire.

Centrale géothermique à vapeur sèche

Ce type de centrale est utilisé lorsque le fluide géothermal arrive à la surface par le puits de production sous forme de vapeur sèche pressurisée et surchauffée à une température allant de 180 °C à plus de 350 °C. Elle est utilisée directement pour faire tourner la turbine de la centrale. Par la suite, la vapeur est condensée et l'eau qui en résulte, alors refroidie, est retournée dans le réservoir géothermique par le puits d'injection. La technologie utilisée s'appelle « cycle de Rankine » (dit classique).

CENTRALE GÉOTHERMIQUE À VAPEUR HUMIDE

CENTRALE GÉOTHERMIQUE À CYCLE BINAIRE

Centrale géothermique à vapeur humide

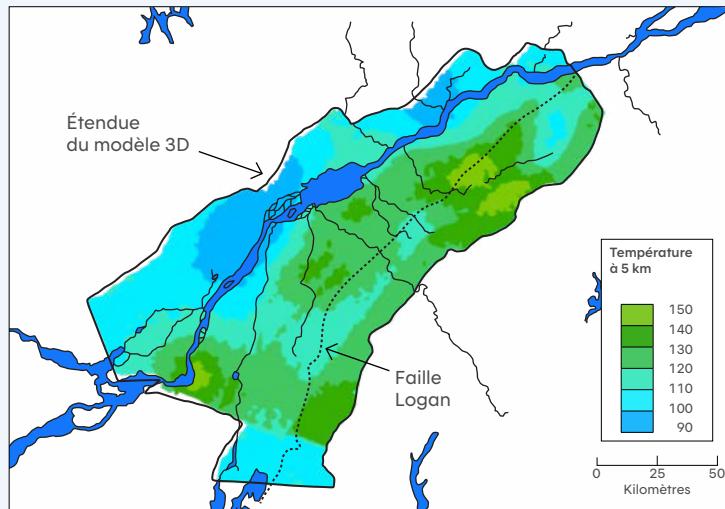
C'est le type de centrale choisi lorsque, en arrivant à la surface par le puits de production, le fluide géothermal est constitué d'un mélange d'eau et de vapeur, pressurisé à une température supérieure à 180 °C. On fait d'abord passer le fluide dans le réservoir de détente pour faire abaisser sa pression – ou dans deux réservoirs selon qu'il s'agit d'une centrale avec cycle à vaporisation simple ou double. Une fois séparée de l'eau, la vapeur humide fait tourner la turbine de la centrale. Par la suite, elle est condensée et l'eau qui en résulte, alors refroidie, est retournée dans le réservoir géothermique par le puits d'injection. Ici aussi, la technologie utilisée est le cycle de Rankine dit classique. La différence réside dans le fait que le fluide géothermal puisé dans le réservoir doit subir une vaporisation pour faire fonctionner la turbine.

Centrale géothermique à cycle binaire

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, c-a-d utilise un second fluide de travail par l'intermédiaire duquel l'énergie est produite. Si les éléments permettant la présence du fluide géothermal sont présents naturellement (chaleur, fluide, environnement géologique perméable) on parlera alors de centrale géothermique conventionnelle ou hydrothermale. Si ce n'est pas le cas on parlera de géothermie profonde stimulée.

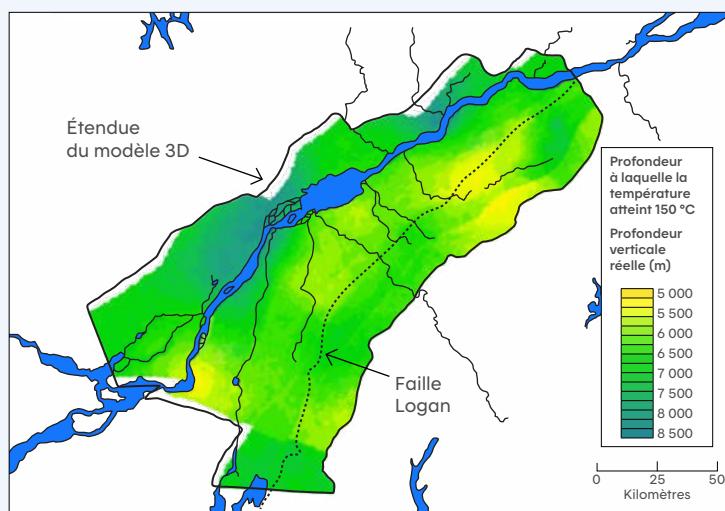
Potentiel géothermique du Québec

TEMPÉRATURES SOUTERRAINES DANS LES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT À 5 KM DE PROFONDEUR



Source: Bédard et coll., 2020.

PROFONDEUR DES ROCHES ATTEIGNANT 150 °C DANS LES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT



Source: Bédard et coll., 2020.

Défis techniques

Les défis techniques à long terme sont nombreux. En voici quelques exemples :

- Élaborer des méthodes de prospection avancées et efficaces.
- Réduire les coûts de forage à de grandes profondeurs.
- Maîtriser, à partir de la surface, la formation et l'exploitation des réservoirs géothermiques profonds.
- Améliorer la conversion de chaleur en électricité en utilisant de nouveaux cycles thermodynamiques.
- Concevoir des modèles de financement diversifiés à risque minimal.

Changements climatiques et qualité de l'air

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de contaminants atmosphériques associés aux substances contenues dans les fluides géothermaux varient selon les conditions naturelles des sites de production. Les plus courants sont le CO₂ et le H₂S. En 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. Pendant l'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 seraient similaires à ceux des autres filières d'énergie renouvelable, du moins pour ce qui est des centrales à cycle binaire exploitant un SGS. Les matériaux employés ainsi que la fabrication et le transport des équipements sont les éléments qui comptent le plus dans l'analyse du cycle de vie. Il faut aussi considérer le type de machinerie utilisé pour le forage, le nombre de puits de production et d'injection creusés ainsi que leur profondeur.

Étant donné que les conditions d'exploitation des centrales géothermiques sont très différentes les unes des autres, il est difficile d'en tirer des généralités. En ce qui concerne les changements climatiques, par exemple, elles peuvent parfois présenter 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 d'un projet de géothermie profonde sur ces espèces, et ce, avant même la phase de réalisation.

Des produits chimiques sont ajoutés à l'eau injectée dans les puits, mais celle-ci circule 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, il faut concevoir la centrale de façon à respecter les caractéristiques du site et à protéger les espèces animales qui s'y trouvent.

Santé et qualité de vie

Les bruits de fonctionnement d'une centrale géothermiques 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.

Par la vue de son panache de vapeur, une centrale géothermique 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'usage de l'eau peut devenir problématique dans les régions où cette ressource est limitée.

Aménagement du territoire

Une centrale géothermique occupe peu d'espace au sol 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 ne nuit pas aux activités agricoles à proximité. Les tours de refroidissement ne consomment pas d'eau, mais elles occupent une grande superficie.

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, il est désormais courant de réinjecter les fluides géothermaux dans les réservoirs.

La fracturation hydraulique peut engendrer des microséismes. Déetectables par des appareils mais généralement non ressentis par les êtres humains, ces tremblements de terre atteignent moins de trois sur l'échelle de Richter. Ce phénomène est quelquefois observé lors d'une fracturation hydraulique visant à 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 événements naturels de ceux provoqués par les fracturations hydrauliques.

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 ce type d'impact.

Une utilisation polyvalente des sites de production pourrait améliorer l'économie régionale. Par exemple, au lieu d'être réinjectés dans les réservoirs, les fluides géothermaux pourraient servir à créer des habitats fauniques ou à favoriser le tourisme littoral, comme dans le cas du Lagon bleu, une station thermale en Islande. La chaleur résiduelle des centrales géothermiques pourrait encourager l'implantation d'autres installations, 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 un sondage réalisé en 2013 par 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., et coll. 2013. « **Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation** ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, p. 446-463.
2. Bédard, K., et coll. 2020. « **Deep geothermal resource assessment of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Québec) based on 3D regional geological modelling** ». (En ligne). *Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources*, no 6, art. 46. doi : 10.1007/s40948-020-00170-0.
3. Bouchard, V. 2012. *Projet géothermique à Fort Liard*. (En ligne). <http://www.aquilon.nt.ca/article/Une-premiere-au-Canada-201206281501/default.aspx>. Site consulté le 2 décembre 2016.
4. Delony, J. 2016. *Outlook: Future of Geothermal Industry Becoming Clearer*. (En ligne). <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2016/01/2016-outlook-future-of-geothermal-industry-becoming-clearer.html>. Site consulté le 2 décembre 2016.
5. Dipippo, R. 2012. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact Third Edition*. (En ligne). https://www.u-cursos.cl/usuario/c658fb0e38744551c1c51c640649db2e/mi_blog/r/Geothermal_Power_Plants.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
6. ÉS Géothermie. s. d. *Centrale de Soultz-sous-forêts*. (En ligne). <https://geothermie.es.fr/references/projet-geie-emc/>. Site consulté le 17 décembre 2020.
7. Geothermal Energy Association. 2007. *A Guide to Geothermal Energy and the Environment*. (En ligne). <http://geo-energy.org/reports/environmental%20guide.pdf>. Document consulté le 2 décembre 2016.
8. Glassley, W. E. 2014. *Geothermal Energy Renewable Energy and the Environment*. (En ligne). 2e éd. Boca Raton, CRC Press, 423 p. <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/b17521>. Site consulté le 2 décembre 2016.
9. Huttner, G. W. 2020. « **Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report** », Proceedings World Geothermal Congress 2020 Reykjavík, Iceland, April 26 – May 2, 2020. (En ligne). <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf>. Document consulté le 8 décembre 2020.
10. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2020. *Renewable Power General Cost in 2019*. (En ligne). Abu Dhabi, IRENA, 144 p. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf. Document consulté le 17 décembre 2020.
11. Jessop, A. M., M. M. Ghemeshei, et M. Drury. 1991. « **Geothermal Energy in Canada** ». *Geothermics*, vol. 20, p. 369-385.
12. Lavoie, R., M. Malo, et J. Raymond. 2015. *Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde. Rapport final*. (En ligne). Préparé pour Hydro-Québec. Rapport de recherche (R1650). Québec, INRS, Centre Eau Terre Environnement. <http://espace.inrs.ca/3346/>. Site consulté le 17 décembre 2020.
13. Lobel, T. 2020. « **De l'or noir à l'or bleu** » [Enregistrement vidéo]. Découverte. Épisode du dimanche 8 novembre 2020. Société Radio-Canada. <https://ici.radio-canada.ca/tele/découverte/site/segments/reportage/208722/énergie-deep>. Site consulté le 17 décembre 2020.
14. Lund, J. W., et A. N. Toth. 2020. « **Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review** », Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavík, Iceland, April 26 – May 2, 2020. (En ligne). <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf>. Document consulté le 17 décembre 2020.
15. Majorowicz, J., et V. Minea. 2012. « **Geothermal Energy Potential in the St-Lawrence River Area, Québec** ». *Geothermics*, vol. 43, p. 25-36.
16. Majorowicz, J. A., et coll. 1999. « **Present heat flow along a profile across the Western Canada Sedimentary Basin: the extent of hydrodynamic influence** ». Dans A. Foester, et D. Merriam (dir.). *Geothermics in Basin Analysis*. Computer Applications in the Earth Sciences. s. l., Kluwer Academic/Plenum Publishers, p. 61-80.
17. Majorowicz, J. A., et M. Moore. 2008. *Enhanced Geothermal Systems (EGS) Potential in the Alberta Basin*. (En ligne). http://www.cangea.ca/uploads/3/0/9/7/30973335/albertaegspotentialreport_s.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
18. Massachusetts Institute of Technology. 2006. *The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. (En ligne). https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
19. Menberg, K., et coll. 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.
20. Ressources naturelles Canada. 2012. *Geothermal Energy Resource Potential of Canada*. (En ligne). http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/rncan-nrcan/M183-2-6914-eng.pdf. Document consulté le 2 décembre 2016.
21. Richard, M.-A., et coll. 2017. *Intégration de la géothermie profonde dans le portefeuille énergétique canadien*. Préparé pour Hydro-Québec. Rapport IREQ-2017-0032. Shawinigan, IREQ et Hydro-Québec, 163 p.
22. Richard, M.-A. 2016. *Production d'électricité avec des systèmes géothermiques stimulés au Québec : analyse des résultats d'un outil de simulation*. Préparé pour Hydro-Québec. Rapport IREQ-2016-0001. Varennes, IREQ et Hydro-Québec, 146 p.
23. S. N. 2016. *Meager Creek Geothermal project*. (En ligne). <http://www.electricityforum.com/news/mar04/meager.html>. Site consulté le 2 décembre 2016.
24. World Energy Council. 2013. « **Chapter 9 Geothermal** ». (En ligne). Dans **World Energy Council**. *World Energy Resources. 2013 Survey*. Londres, World Energy Council, p. 9.1-9.62.