



Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde

RAPPORT FINAL

Par

**Roxane Lavoie
Michel Malo
Jasmin Raymond**

Soumis l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)

21 décembre 2015 – Québec

Rapport de recherche 1650

TABLE DES MATIÈRES AVANT-PROPOS	5
1. INTRODUCTION.....	7
2. IMPACTS LIÉS À LA CONSTRUCTION ET À L'AMÉNAGEMENT DE LA CENTRALE.....	8
3. AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE.....	9
3.1. Changements au paysage	9
3.2. Bruit	9
3.3. Utilisation du sol	10
4. IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT NATUREL.....	12
4.1. Air (émissions dans l'atmosphère).....	12
4.2. Eau	13
4.2.1. <i>Utilisation de l'eau (quantité)</i>	13
4.2.2. <i>Qualité</i>	14
4.3. Flore et faune	15
4.4. Déchets solides.....	15
4.5. Sol	16
4.5.1. <i>Subsidence</i>	16
4.5.2. <i>Séismicité</i>	16
4.5.3. <i>Glissements de terrain</i>	19
4.6. Perte de chaleur non renouvelable	19
5. POLLUTION THERMIQUE.....	20
6. CONCLUSION.....	21
RÉFÉRENCES	23

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Fonctionnement d'une centrale géothermique de type flash	7
Figure 2 – Fonctionnement d'une centrale géothermique de type binaire	7
Figure 3 – Exemples de centrales géothermiques	10
Figure 4 – Chaleur émise par unité d'énergie produite.....	20

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble du cycle de vie de différentes sources d'énergie	13
Tableau 2 – Comparaison des impacts potentiels des centrales flash et binaire	22

Avant-propos

Dans le cadre du programme Initiatives stratégiques pour l'innovation, l'INRS-ETE a obtenu une subvention du Fonds de recherche Nature et technologies du Québec pour un projet intitulé « Potentiel de la géothermie profonde au Québec ». Ce projet, réalisé en partenariat avec Hydro-Québec, visait à initier un programme de recherche pour développer la filière de production d'énergie électrique à partir de la géothermie. En effet, des études récentes suggèrent que le Québec pourrait comporter des ressources géothermiques hydrothermales dans les bassins sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et des Appalaches, et des ressources liées aux systèmes stimulés par fracturation hydraulique dans les roches du socle sous-jacentes. Ce projet se divise en trois volets :

- 1) l'exploration géologique et l'évaluation des ressources;
- 2) l'ingénierie des réservoirs et la simulation de l'exploitation; et
- 3) les impacts environnementaux.

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du volet 3 de ce projet de recherche. Il a pour objectif principal de faire l'état de la littérature par rapport aux impacts environnementaux potentiels de la production d'électricité par géothermie. Il a été réalisé dans le cadre du stage postdoctoral de Roxane Lavoie, une étudiante boursière, à l'INRS-ETE, sous la direction de Michel Malo et de Jasmin Raymond, au cours de la session d'hiver 2015. Les résultats présentés dans ce rapport sont issus d'une revue de la littérature réalisée par la stagiaire.

1. Introduction

La production d'énergie géothermique, par rapport aux types de production d'énergie plus traditionnels, comporte peu d'impacts environnementaux. De plus, ceux-ci ont principalement lieu dans les phases de construction et d'aménagement de la centrale. Durant les opérations, les impacts sur l'environnement, en particulier dans le cas de centrales binaires, seront minimes. Certains risques non négligeables existent toutefois. Il convient donc de connaître les impacts potentiels sur l'environnement naturel, afin de faire une gestion adéquate des activités liées à la production d'énergie géothermique, ce qui permettra de maintenir au minimum les conséquences négatives éventuelles.

Il existe deux principaux types de centrales géothermiques, les centrales flash et les centrales binaires, et leurs impacts environnementaux sont très différents. Il convient donc ici, en premier lieu, de définir ces deux types de centrales et d'en indiquer les différences. Dans les centrales flash, des fluides à des températures de plus de 182 °C sont pompés sous haute pression dans un réservoir en surface, maintenu à des pressions inférieures, ce qui provoque la vaporisation rapide du fluide. La vapeur fait ensuite tourner une turbine, qui fait fonctionner un générateur (Figure 1). Dans le cas d'une centrale binaire, les fluides géothermiques n'entrent jamais en contact avec la turbine. En effet, des fluides géothermiques à des températures de moins de 200 °C passent dans un échangeur de chaleur, vaporisant un fluide secondaire avec un point d'ébullition plus bas que l'eau. C'est ce fluide secondaire qui fait fonctionner la turbine (Figure 2) (US Department of Energy, 2015). Les centrales binaires fonctionnent donc en circuit fermé, ce qui signifie que les fluides géothermiques n'entrent jamais en contact avec l'atmosphère, d'où leurs impacts environnementaux significativement moindres.

Ce rapport, basée sur une revue extensive de la littérature, détaille les impacts potentiels de la production d'énergie géothermique et propose quelques pistes pour la mise en place de bonnes pratiques pour minimiser les effets négatifs de cette activité sur l'environnement naturel. Les impacts environnementaux des centrales flash et binaires sont traités dans ce document, en mettant en évidence les différences principales entre les deux types. La première sous-section s'attarde en particulier aux impacts liés à la construction et à l'aménagement de la centrale, car il s'agit de l'étape où les risques pour l'environnement sont les plus grands. La seconde sous-section s'intéresse aux impacts sur l'aménagement du territoire, soit les changements au paysage, le bruit et l'occupation du sol. La troisième

sous-section, elle, porte sur les impacts sur l'environnement naturel, organisés par élément : air, eau, flore et faune, sol, ainsi que déchets solides et perte de chaleur non renouvelable. Finalement, ce chapitre contient également une mention sur la pollution thermique, qui est particulière à la production d'énergie par géothermie.

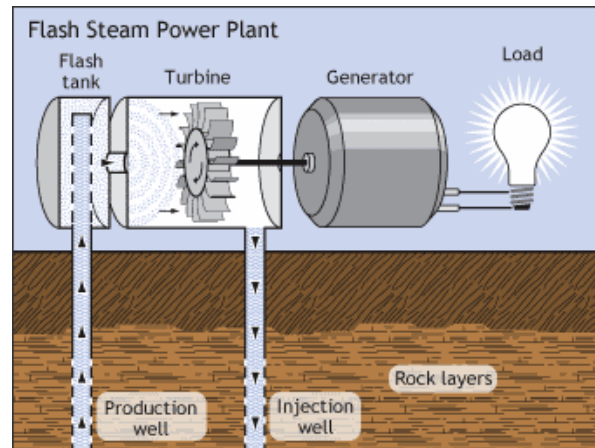


Figure 1 – Fonctionnement d'une centrale géothermique de type flash (Source: US Department of Energy).

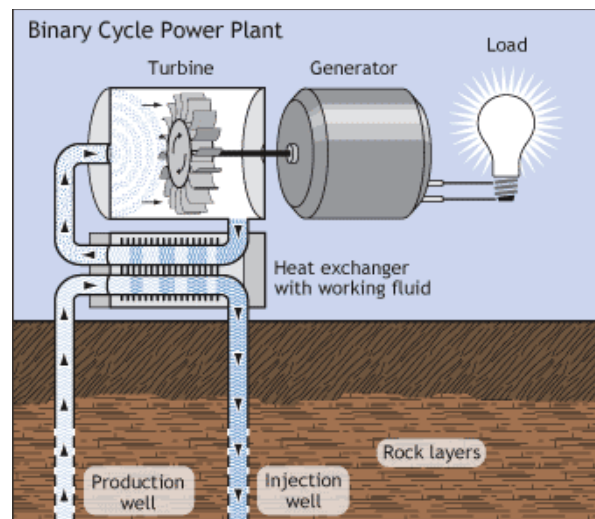


Figure 2 – Fonctionnement d'une centrale géothermique de type binaire (Source: US Department of Energy).

2. Impacts liés à la construction et à l'aménagement de la centrale

La plus grande part des impacts environnementaux potentiels de la production d'électricité géothermique a lieu pendant les étapes préliminaires à la production d'énergie, soit le forage et la construction des installations. En effet, plus de 80% de l'impact sur les changements climatiques, la santé humaine et les ressources, ainsi que 60% de l'impact sur la qualité des écosystèmes auraient lieu pendant cette phase (Frick et al., 2010; Lacirignola et Blanc, 2013). Globalement, 96% de l'impact environnemental se produirait durant la phase de construction (Guo et al., 2015). Ce serait en particulier la mise en place d'infrastructures souterraines qui aurait les impacts les plus importants sur l'environnement. En effet, lors de ces étapes, plusieurs substances potentiellement polluantes peuvent être utilisées et des déversements accidentels sont donc possibles. L'utilisation de certaines de ces substances peut également résulter en une émission de gaz risquant de polluer l'atmosphère, et les rebus de forage peuvent contaminer le sol et l'eau. Par ailleurs, lorsqu'une stimulation par fracturation hydraulique est nécessaire pour créer un réservoir, il est possible que la sismicité soit accrue. De plus, si la stimulation est faite à l'aide de produits chimiques, il y a également un risque que ces produits entrent en contact avec le sol, l'eau de surface ou souterraine et contaminent l'environnement naturel. Nous reviendrons sur ces impacts dans les sections subséquentes, car ils peuvent également se produire durant les opérations. Cependant, certains autres impacts potentiels sont uniquement susceptibles de se produire pendant la construction et l'aménagement de la centrale. Nous les énumérerons dans cette section, sans s'y attarder trop en détail car ils ne sont pas spécifiques à la production d'énergie géothermique.

En effet, comme le sol est mis à nu lors de la mise en place de routes d'accès et de la préparation du trajet des pipelines d'eau chaude, des puits et des bassins de rétention, ces activités peuvent entraîner l'érosion du sol lors de précipitations. Il convient donc de stabiliser le sol adéquatement pour éviter la perte de sol et la migration des sédiments vers les cours d'eau à proximité (Mutia et Simboyi, 2015).

De plus, des déchets solides et liquides sont générés, principalement par les opérations de forage, par l'installation temporaire de travailleurs dans le secteur, les ateliers et les cours d'entreposage. Ces déchets peuvent inclure des contenants en plastique, des cartons, des retailles de métal, des sacs de bentonite, de l'huile usagée et d'autres matières résiduelles domestiques. Les déchets liquides sont principalement

constitués de saumures recueillies lors des tests de pompage. Ces déchets peuvent être réutilisés pour le forage et éventuellement réinjectés. Entre temps, ils doivent être entreposés dans des réservoirs étanches (Mutia et Simboyi, 2015).

C'est donc durant les étapes de construction et d'aménagement de la centrale que la plus grande proportion d'émissions de gaz polluants a lieu, principalement à cause de l'utilisation de diesel pour le fonctionnement des machines (Guo et al., 2015). C'est également durant cette étape que la majorité des déchets solides et liquides sont produits, en particulier lors des forages et des essais. Le déboisement et la mise en place de chemins d'accès, en plus de résidences temporaires pour les travailleurs, ont également des impacts significatifs sur les habitats. De plus, la fracturation hydraulique, ayant surtout lieu lors de la mise en place des installations afin de stimuler le réservoir, peut causer de la sismicité. Nous reviendrons en détail sur cette notion dans les prochaines sections, car l'injection prenant place lors des opérations peut également accroître la sismicité locale. Même si ces activités sont temporaires, il convient de bien planifier les premières étapes de test et de construction de la centrale afin de s'assurer de minimiser au maximum les rejets de substances potentiellement polluantes dans l'environnement naturel ainsi que la perte d'habitats.

3. Aménagement du territoire

3.1. Changements au paysage

Comme pour toute construction d'une telle ampleur, les centrales géothermiques peuvent avoir un impact significatif sur le paysage d'une région. En effet, les pipelines, les tours de refroidissement, les bassins d'entreposage, le bâtiment et les lignes de transmission sont des infrastructures de taille considérable qui peuvent être visibles à distance (Figure 3) (Dickson et Fanelli, 2004; Kagel et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Mutia et Simboyi, 2015). Le déboisement de superficies non-négligeables est également nécessaire pour la construction des installations (Massachusetts Institute of Technology, 2006). En outre, les véhicules et l'équipement de construction ainsi que les foreuses peuvent avoir un impact visuel négatif de façon temporaire (Kagel et al., 2007). L'éclairage de nuit constitue également une forme de pollution lumineuse, qui peut être dérangement pour les activités ayant lieu à proximité. De plus, selon le type de centrale sélectionné, des émissions de vapeur peuvent affecter la qualité du paysage (Kagel et al., 2007).

Il convient par contre de mentionner que la production d'électricité géothermique requiert des infrastructures plus facilement adaptables à leur environnement que la majorité des autres formes de production d'énergie (DiPippo, 1991; Mutia et Simboyi, 2015). En effet, il est possible d'ajuster le tracé des pipelines et des lignes de transmission, d'en enfouir une partie, ou de peindre la tuyauterie d'une couleur s'harmonisant avec l'environnement local (DiPippo, 1991; Kagel et al., 2007). Par ailleurs, une planification adéquate du site et un design approprié pour le bâtiment, en utilisant des matériaux locaux, peuvent également contribuer à diminuer l'impact visuel des installations (Kagel et al., 2007). Après les forages initiaux, le terrain peut être revégétalisé et il est même possible, sur une partie du territoire occupé, de cohabiter avec d'autres utilisations du sol, comme l'agriculture (Kagel et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006).

L'implantation d'une centrale géothermique peut ainsi avoir un impact considérable sur le paysage local, mais une planification attentive du développement et la mise en place de mesures d'harmonisation permettent de minimiser cet impact aisément.

3.2. Bruit

La construction et l'opération d'une centrale géothermique, comme la plupart des activités de cette nature, peuvent générer des niveaux de bruit potentiellement nuisibles (Abbasi et Abbasi, 2000; Mutia et Simboyi, 2015). Les niveaux de bruit les plus élevés, pouvant aller jusqu'à 115 dBA, sont produits pendant le forage, la stimulation et les phases de test (Adaweh et Idleh, 2015; DiPippo, 1991; Kagel et al., 2007; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Mutia et Simboyi, 2015). Il s'agit donc d'un impact ponctuel dans le temps, qui peut de plus être minimisé par des sourdines (Adaweh et Idleh, 2015). Durant les opérations, il est estimé que la production d'électricité géothermique produirait de 54 à 83 dBA à 900m de la centrale (Kagel et al., 2007; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Les principales sources de bruit seraient le transformateur, la turbine et la tour de refroidissement, en particulier si le refroidissement est fait à l'air (Dickson et Fanelli, 2004; Kagel et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Toutefois, dans l'éventualité où de la vapeur devrait être évacuée en raison d'une situation d'urgence, on pourrait avoir ponctuellement des niveaux de bruit plus élevés (DiPippo, 1991). Des aménagements, comme des sourdines ou des programmes de reforestation localisés adéquatement, peuvent toutefois permettre de réduire les niveaux de bruits bien en-dessous de 65 dBA lorsque nécessaire, et ne sont donc généralement pas considérés comme une nuisance pour le voisinage (Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Gonzalez et al., 2015; Kagel et al., 2007; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003). Certains auteurs affirment qu'à la limite du site où la centrale est implantée, les niveaux de bruits ne dépasseraient pas 28 dBA, soit sous le niveau sonore d'un chuchotement (Kagel et al., 2007).

Il apparaît donc que la pollution sonore n'est pas un enjeu majeur de la production d'électricité géothermique. En effet, il est généralement possible de maintenir les niveaux de bruit bien en-deçà des niveaux acceptables, avec des aménagements adéquats dans certains cas. C'est principalement durant les phases préliminaires aux opérations qu'il faut être vigilant par rapport à l'impact sonore des activités.



Figure 3 – Exemples de centrales géothermiques. A : Installations de conduits au sol près de la centrale de Wairakei, Nouvelle-Zélande. B : Tours de refroidissement, centrale de Rotokawa, Nouvelle-Zélande. C : centrale de Wairakei, Nouvelle-Zélande. D : centrale de Nesjavellir, Islande. Sources : A, B, C - photos de Michel Malo; D - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NesjavellirPowerPlant_edit2.jpg

3.3. Utilisation du sol

La mise en place d'une centrale géothermique requiert le développement d'une partie importante de la superficie du sol, souvent dans des endroits reculés et sensibles (Abbasi et Abbasi, 2000; Union of Concerned Scientists, 2015). En effet, on estime qu'une installation occupe 5 à 10 km² et même possiblement plus, en plus de devoir aménager des chemins d'accès s'il n'en existe pas et de forer le sol en plusieurs endroits (Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Ces modifications dans la morphologie et l'utilisation du sol peuvent affecter les activités ayant lieu à proximité, ainsi que la flore et la faune (Dickson et Fanelli, 2004). Malgré le fait qu'une centrale géothermique constitue une infrastructure de taille, la superficie nécessaire à son développement paraît faible en comparaison de celles utilisées pour

développer l'énergie hydroélectrique. En effet, les cinq principaux réservoirs d'Hydro-Québec occupent des superficies entre 625 et 4 318 Km² (Hydro-Québec, 2015). Il convient tout de même de s'assurer, lors du forage et de la construction du système géothermique, d'aménager les lieux adéquatement afin de permettre une cohabitation harmonieuse avec les autres usages. On estime que, malgré le fait que les centrales géothermiques nécessitent une superficie importante lors de leur développement, environ 2% de cette superficie reste occupée une fois que les travaux de construction et de forage sont terminés (DiPippo, 1991; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Avec certains procédés, plusieurs puits peuvent être forés à partir d'un même emplacement et on peut ainsi réduire la superficie totale nécessaire au développement de la centrale. De plus, les tuyaux peuvent être montés sur des poteaux de soutènement, pour laisser l'espace libre à d'autres activités compatibles, comme l'agriculture ou les pâturages

(DiPippo, 1991; Massachusetts Institute of Technology, 2006).

Ainsi, la production d'énergie par géothermie peut entraîner des changements au paysage et affecte la planification de l'utilisation du sol. De plus, les activités, et en particulier la construction, sont susceptibles de produire des niveaux de bruits pouvant affecter la faune environnante et les habitations à proximité. Des aménagements adaptés et une planification de l'aménagement du territoire adéquate peuvent toutefois aisément diminuer ces impacts à des niveaux généralement acceptables. En effet, la géothermie est l'une des formes de production d'énergie qui s'adapte le plus facilement à son milieu.

4. Impacts sur l'environnement naturel

4.1. Air (émissions dans l'atmosphère)

Plusieurs types de production d'énergie ont pour impact négatif majeur d'émettre des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les centrales géothermiques de type flash ne font pas exception, émettant potentiellement une grande quantité de vapeur, du dioxyde de carbone et du sulfure d'hydrogène, mais aussi, dans certains cas, d'autres substances possiblement toxiques comme du méthane, du mercure, du radon, de l'ammoniaque et du bore, dépendamment de la composition des fluides prélevés (Adaweh et Idleh, 2015; Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Gonzalez et al., 2015; Juliusson et al., 2015; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Mutia et Simboyi, 2015; Quintero-Nunez et al., 2015; Union of Concerned Scientists, 2015). Par exemple, au champ géothermal de Cerro Prieto, au Mexique, des études ont estimé qu'entre 2004 et 2012, une moyenne de 10 400 tonnes/an de sulfure d'hydrogène, de 9 060 tonnes/an de méthane et de 450 500 tonnes/an de dioxyde de carbone ont été produits (Gonzalez et al., 2015). Il est de plus possible, lorsque le refroidissement est fait à l'eau, que de faibles émissions de particules proviennent de l'évaporation du condensat de vapeur (Kagel et al., 2007). Cette source de pollution peut contribuer à une détérioration majeure de l'environnement naturel (Quintero-Nunez et al., 2015). En effet, le sulfure d'hydrogène, caractéristique des champs hydrothermaux, est toxique pour la faune aquatique à des concentrations de 20 ppm (Adaweh et Idleh, 2015). Cette substance possède également une odeur particulière à de faibles concentrations, elle est plus lourde que l'air, ce qui favorise l'accumulation dans les dépressions, et est inflammable et toxique. Il est possible d'en réduire les émissions dans l'environnement à l'aide de condenseurs ou par oxydation (Gonzalez et al., 2015). Toutefois, en comparaison des autres formes d'énergie, les niveaux d'émission des centrales géothermiques, spécialement pour les centrales binaires qui sont en circuit fermé, sont faibles (Adaweh et Idleh, 2015; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Rybach, 2003). En effet, comme on peut le voir dans le Tableau 1, les émissions de CO₂ et de NO_x pour l'ensemble du cycle de vie d'une centrale géothermique sont comparables à celles de la production d'énergie solaire, soit de 79 g/kWh et de 0.28 g/kWh, respectivement. Les émissions de SO₂, quant à elles, sont très faibles, se situant plutôt au niveau de l'énergie éolienne ou d'une petite centrale

hydroélectrique, à 0.02 g/kWh. Il existe cependant une incertitude par rapport à l'apport de CO₂ des centrales géothermiques. En effet, certaines études tendent à démontrer que le CO₂ compris dans les fluides serait naturellement rejeté dans l'atmosphère et que les centrales n'accroîtraient pas les émissions, alors que d'autres indiquent que certaines centrales augmenteraient jusqu'à 6 fois les rejets de CO₂ dans l'atmosphère (Aksoy et al., 2015). Il conviendrait donc d'étudier cette question plus en détail. En outre, les centrales géothermiques binaires en circuit fermé – seul type techniquement envisageable dans un contexte québécois de géothermie profonde – présentent, quant à elles, des niveaux d'émission négligeables ou nuls pendant les opérations pour toutes les substances mentionnées précédemment (Dickson et Fanelli, 2004; Kagel et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Rybach, 2003; Union of Concerned Scientists, 2015), puisque les fluides n'entrent jamais en contact avec l'atmosphère.

Par ailleurs, l'utilisation de diesel lors du forage et de la construction de la centrale produit des émissions polluantes et contribue à la production de gaz à effet de serre (Lacirignola et Blanc, 2013; Mutia et Simboyi, 2015). Frick et al. (2010) estiment qu'autour de 90% des émissions totales de gaz à effet de serre auraient lieu lors de la mise en place d'infrastructures souterraines et qu'entre 2 et 10% environ auraient lieu lors de la construction des infrastructures en surface. C'est donc encore une fois pendant la construction, le forage et les phases de tests que la majorité des impacts sont produits, en particulier par l'utilisation de grandes quantités de diesel pour faire fonctionner la machinerie et par le rejet de gaz indésirables lors du forage ou de tests de débit (Dickson et Fanelli, 2004; Lacirignola et Blanc, 2013; Union of Concerned Scientists, 2015). Cette affirmation est d'autant plus vraie pour les centrales binaires qui, tel que mentionné précédemment, ne produisent pratiquement pas d'émissions pendant les opérations.

En somme, la production d'énergie par géothermie n'émet que très peu, voire pas du tout, de gaz à effet de serre et de gaz toxiques dans l'atmosphère. Les principales émissions ont lieu durant les phases de construction et de test et, par la suite, les émissions sont très faibles pour les systèmes conventionnels, et pratiquement nulles pour les centrales binaires. Le faible niveau d'émissions constitue d'ailleurs l'un des principaux avantages de l'énergie géothermique (Kagel et al., 2007). Il est même suggéré par certains auteurs que du CO₂ dissous dans l'eau et réinjectée dans le réservoir pourrait permettre de réduire l'apport en gaz rejetés dans l'atmosphère (Aksoy et al., 2015).

Tableau 1 - Émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble du cycle de vie de différentes sources d'énergie. Tiré de l'Agence Internationale de l'Énergie (1998); Akella et al. (2009).

Sources d'énergie	Gaz à effet de serre		
	CO ₂ g/kWh	SO ₂ g/kWh	NO _x g/kWh
Charbon (bonnes pratiques)	955	11.8	4.3
Pétrole (bonnes pratiques)	818	14.2	4.0
Gaz naturel	430	-	0.5
Petit hydroélectrique	9	0.03	0.07
Grand hydroélectrique	3.6-11.6	0.009-0.024	0.003-0.006
Éolien	7-9	0.02-0.09	0.02-0.06
Solaire photovoltaïque	98-167	0.2-0.34	0.18-0.30
Solaire thermique électrique	26-38	0.13-0.27	0.06-0.13
Cultures énergétiques	17-18	0.07-0.16	1.1-2.5
Géothermique (moyenne pour tous les types)	79	0.02	0.28

4.2. Eau

L'eau est une ressource particulièrement vulnérable aux changements environnementaux. Il est donc essentiel de porter attention aux impacts potentiels sur les ressources en eau lors de l'implantation d'une nouvelle activité. Comme pour la majorité des autres impacts potentiels liés à la production d'électricité par géothermie, il apparaît que les principaux risques auraient lieu pendant les étapes de construction et de forage. Durant les opérations, les impacts potentiels dépendront fortement du type de centrale prévu.

4.2.1. Utilisation de l'eau (quantité)

D'abord, la construction d'une centrale géothermique, et en particulier les étapes de forage et de fracturation, s'il y a lieu, requièrent des volumes d'eau importants, en particulier si le réservoir n'est pas déjà saturé. Dans le cas d'un réservoir très perméable, il peut être difficile de prévoir les quantités d'eau nécessaires. Les centrales avec refroidissement à l'eau utilisent également des volumes d'eau considérables pour la condensation. Par ailleurs, les centrales de type flash utilisent de grands volumes d'eau pour remplacer, lors de la réinjection, l'eau perdue en vapeur durant le processus (Adawah et Idleh, 2015; Dickson et Fanelli, 2004; Kagel et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Union of Concerned Scientists, 2015). Il est estimé qu'environ 50% du liquide pompé est évaporé dans l'atmosphère (Kagel et al., 2007). Il

n'est toutefois pas nécessaire d'utiliser de l'eau de bonne qualité. Par exemple, dans le système des Geysers, aux États-Unis, on réinjecte des eaux usées traitées pour conserver la pression dans le réservoir. De plus, les centrales binaires, fonctionnant en circuit fermé et employant habituellement une technique de refroidissement à l'air, n'enregistrent pratiquement aucune perte en eau et ne doivent donc généralement pas utiliser d'autres sources d'eau pour compenser (Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Kagel et al., 2007; Union of Concerned Scientists, 2015). L'eau utilisée pour le forage, la construction et les opérations d'une centrale géothermique proviendra habituellement de sources souterraines ou de surface à proximité (Abbasi et Abbasi, 2000; Kagel et al., 2007). Dépendamment du contexte, et des autres utilisations de ces ressources en eau, le prélèvement de grandes quantités d'eau pourrait influencer les niveaux d'eau et ainsi affecter les quantités d'eau disponibles pour les écosystèmes, les activités récréatives ou l'approvisionnement en eau potable. Par ailleurs, si l'eau est injectée dans le réservoir, elle n'est plus disponible pour circuler dans le cycle de l'eau (Abbasi et Abbasi, 2000; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Il est toutefois pertinent de mentionner qu'en comparaison d'autres méthodes de production d'énergie, les quantités d'eau nécessaires pour tout le cycle de vie d'une centrale géothermique sont faibles (de 0,01 à 0,73 gallons par kWh comparativement à 0,26 à 1,53 gallons pour une centrale au charbon, 0,24 à 0,98 gallons pour une

centrale au gaz naturel ou 0,07 à 1,12 gallons par kWh pour une centrale à énergie solaire) (Clark et al., 2011).

De façon générale, les activités liées à une centrale géothermique ne sont pas problématiques par rapport à leur utilisation d'eau, et spécialement lorsqu'il s'agit d'une centrale binaire. Il convient tout de même de s'assurer, avant de faire les prélèvements, que les quantités d'eau nécessaires aux besoins de la centrale ne compromettent pas les besoins des autres activités dépendant de la même source d'eau (Kagel et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Les analyses et les plans de gestion des eaux devront tenir compte de tous les autres usages, mais également de la saisonnalité, afin de s'assurer que les prélèvements n'aient pas lieu en période d'étiage. L'emploi d'autres méthodes de refroidissement, telles que l'utilisation de concentrés géothermaux ou d'air, permettent également de diminuer les besoins en eau de la centrale (Abbasi et Abbasi, 2000; DiPippo, 1991; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Union of Concerned Scientists, 2015).

4.2.2. Qualité

Plusieurs substances potentiellement polluantes sont utilisées à différentes étapes du développement et de la production d'énergie géothermique. Si un déversement de ces substances a lieu, l'eau de surface ou l'eau souterraine pourraient être contaminés. Il est donc impératif d'être préparé à une telle éventualité afin d'agir rapidement pour éviter des impacts négatifs sur la santé publique ou les écosystèmes.

D'abord, le forage et la construction requièrent une grande quantité de diesel afin de produire de l'énergie pour faire fonctionner la machinerie en plus de nécessiter différentes substances chimiques pour certains processus, notamment pour produire la boue qui sert à faciliter l'extraction des rebuts. D'autres substances potentiellement polluantes, en particulier des acides, peuvent également être utilisées si le contexte requiert une stimulation chimique afin de créer le réservoir. Au cours du transport, de la manipulation ou de l'utilisation de ces substances, un déversement pourrait se produire et contaminer l'eau de surface par ruissellement ou le sol et l'eau souterraine par infiltration (Adaweh et Idleh, 2015; Lacirignola et Blanc, 2013).

Durant les opérations, les risques de pollution de l'eau sont principalement liés à des accidents ou à des bris. En effet, les eaux géothermales contiennent des concentrations variables de minéraux potentiellement toxiques et d'autres substances (Massachusetts Institute of Technology, 2006; Mutia et Simboyi, 2015). Par exemple, elles peuvent contenir, en faible

concentration, du dioxyde de carbone, du sulfure d'hydrogène, de l'ammoniaque, du méthane, du chlorure de sodium, du bore, de l'arsenic, du plomb, du cadmium, du fer, du zinc, du manganèse, du lithium, de l'aluminium ou du mercure (Adaweh et Idleh, 2015; Dickson et Fanelli, 2004; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Mutia et Simboyi, 2015; Quintero-Nunez et al., 2015). Des études récentes ont également identifié de très faibles émissions de toluène, de xylène, d'éthylbenzène et de Rn-222 (Quintero-Nunez et al., 2015). Sans l'activité humaine, ces eaux n'entreraient probablement jamais en contact avec les eaux superficielles. Le forage de puits et le transport de ces eaux pour la production d'énergie crée une nouvelle voie de migration de ces fluides potentiellement polluants et/ou toxiques vers la surface. Un bon exemple de ce type de contamination est le champ géothermal de Cerro Pietro, où 88% des saumures résiduelles sont entreposées dans un lagon d'évaporation de 7,2 milles carrés, entraînant une pollution du sol et des aquifères superficiels à proximité, principalement à cause de la salinité élevée des fluides géothermaux (60 000 ppm de solides totaux dissous) (Quintero-Nunez et al., 2015). De plus, les eaux géothermales ont des températures élevées, ce qui peut affecter la température des cours d'eau en cas de déversement et modifier les habitats (Kagel et al., 2007). Il convient donc de s'assurer que les eaux extraites du sous-sol restent isolées des ressources de surface jusqu'à la réinjection ou soient adéquatement entreposées dans des bassins adéquats avec une membrane étanche et qu'elles soient traitées avant d'être rejetées dans l'environnement (Adaweh et Idleh, 2015; Dickson et Fanelli, 2004). La réutilisation des fluides permet également de minimiser leur transport et la quantité nécessaire (Adaweh et Idleh, 2015). Dans le cas de centrales binaires, en circuit fermé, les eaux géothermales sont directement réinjectées et ne sortent pas du système, à moins d'un accident. Ce type de centrale permet donc d'éviter les risques liés à l'entreposage, au traitement et au transport d'eaux géothermales.

Par contre, toutes les centrales sont sujettes à une contamination de l'eau souterraine à travers un coffrage non-étanche, ou à un déversement dû à un bris d'équipement. Il convient de noter qu'aucune contamination due à un coffrage défectueux n'a été répertoriée, mais le risque d'un tel événement est bien réel (Adaweh et Idleh, 2015; DiPippo, 1991; Kagel et al., 2007; Union of Concerned Scientists, 2015). L'intégrité des coffrages est primordiale pour prévenir ce type de contamination. De plus, des coffrages étanches devraient être utilisés jusqu'à une profondeur correspondant au réservoir géothermique pour éviter que des fluides puissent s'écouler dans les niveaux

supérieurs (Adaweh et Idleh, 2015). Le design de la centrale doit ainsi tenir compte des différentes voies potentielles de contamination pour éviter les fuites, mais également pour permettre d'agir rapidement en cas d'accident, par exemple en installant des valves d'isolement en cas de tuyaux défectueux (Massachusetts Institute of Technology, 2006). De plus, des plans de mesures d'urgence doivent être élaborés et les ressources nécessaires pour agir en cas d'accident doivent être facilement disponibles. Un suivi en temps réel devrait par ailleurs être effectué pour permettre une action rapide en cas de problème (DiPippo, 1991; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Ces mesures permettront de minimiser le risque d'impacts négatifs sur les autres utilisateurs de la ressource.

On peut donc voir que la production d'énergie géothermique pose des risques certains pour les ressources en eau. L'utilisation de grandes quantités d'eau, en particulier lors du développement, et le risque d'un déversement de substances potentiellement toxiques pourraient porter atteinte à la qualité et à la quantité de la ressource. Toutefois, plusieurs mesures liées au design, à la planification, au suivi et aux bonnes pratiques de gestion des fluides permettent de minimiser ce risque et de s'assurer une protection adéquate des ressources en eau.

4.3. Flore et faune

Les centrales géothermiques, comme toute construction, ont un impact sur le milieu dans lequel elles s'insèrent et affectent par le fait même les écosystèmes. Une perte de végétation considérable a lieu lors du déboisement pour la construction du site et des routes d'accès ainsi que lors du forage des puits (Dickson et Fanelli, 2004; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Mutia et Simboyi, 2015). Ces modifications dans la morphologie en surface affectent les habitats et peuvent potentiellement priver certaines espèces de leur milieu. Pour les centrales traditionnelles, des contaminants peuvent être transportés par l'air. En Californie, des dépôts de minéraux issus des tours de refroidissement ont été retrouvés jusqu'à 1200m, affectant la végétation et les cours d'eau (Abbasi et Abbasi, 2000). Encore une fois, les centrales binaires n'ont pas ce problème puisque les minéraux n'entrent jamais en contact avec l'atmosphère. Par ailleurs, l'un des avantages des centrales géothermiques par rapport à d'autres types de centrales est qu'il est possible de reboiser une partie de la superficie du terrain après la complétion des forages. Il est donc recommandé de prévoir des études de végétation et un plan de reboisement avant le début

des travaux (Mutia et Simboyi, 2015). De cette façon, on s'assure de recréer un milieu se rapprochant de l'environnement naturel du secteur, et ainsi de minimiser l'impact sur la faune et la flore locales.

4.4. Déchets solides

Bien que la production d'électricité géothermique produise peu de déchets solides, il s'agit possiblement de l'élément ayant l'impact le plus important sur les écosystèmes. En effet, le forage entraîne la production de boues et de déblais pouvant contenir des matières contaminées (Adaweh et Idleh, 2015; Kagel et al., 2007; Lacirignola et Blanc, 2013; Mutia et Simboyi, 2015). Il s'agit de l'une des seules étapes, en particulier dans le cas de centrales binaires, où des substances potentiellement polluantes risquent d'entrer en contact avec l'environnement naturel en surface. Il importe donc d'entreposer ces matières dans des réservoirs étanches et d'en disposer sécuritairement (Kagel et al., 2007).

Durant les opérations, la quantité de déchets solides produite par les centrales géothermiques est généralement négligeable, car les substances sont soit recyclées dans le système et n'entrent jamais en contact avec l'eau, la terre ou l'air, soit elles sont en concentrations trop faibles pour poser problème (Kagel et al., 2007). Il est tout de même possible que des substances retirées des fluides, comme par exemple des minéraux dissous, tels que des sulfures, silicates ou carbonates, soient déversées en cas d'accident. Il convient donc de connaître les substances pouvant être présentes dans les fluides et d'avoir un plan de mesures d'urgence approprié dans l'éventualité d'un déversement accidentel (Adaweh et Idleh, 2015; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Une autre source possible de déchets solides est l'accumulation potentielle de substances radioactives sur les filtres, qui provient de la réaction entre l'eau et la roche, en concentrations faibles. Il faut s'assurer de les retirer et d'en disposer sécuritairement sur un site qui fait l'objet d'un suivi, dans le but d'éviter la contamination de l'environnement naturel, mais également pour les travailleurs (Cuenot et al., 2015; Lacirignola et Blanc, 2013). Par exemple, à Soultz-sous-Forêts, des zonages restrictifs ont été mis en place dans les secteurs du site où les substances radioactives sont récoltées et entreposées. Une entente avec l'agence nationale française de gestion des déchets nucléaires a également été conclue pour le ramassage, la caractérisation et le traitement de ces matières résiduelles (Cuenot et al., 2015). Si les fluides sont traités, les résidus de ce processus constituent une autre source de déchets solides. La

quantité est estimée à 1kg par m³ d'eau traitée. Ces résidus peuvent contenir des métaux lourds, toxiques pour l'environnement (Adaweh et Idleh, 2015).

Les déchets solides produits lors du forage des puits pour la production d'énergie par géothermie peuvent ainsi poser un risque pour l'environnement naturel. Il convient donc de les caractériser et de les gérer adéquatement pour éviter toute contamination par ruissellement ou infiltration. Les autres sources de déchets solides présentent généralement des quantités faibles, mais elles doivent être connues, car les solides dissous peuvent être toxiques et la façon dont on en dispose devrait donc être encadrée. De plus, des mesures doivent avoir été prévues en cas de déversement accidentel.

4.5. Sol

Comme la production d'énergie par géothermie requiert le forage de puits, cette activité a des impacts potentiels considérables sur le sol et le sous-sol. Ceux-ci sont en marge des autres impacts environnementaux, car le risque potentiel sur les organismes vivants en surface est moindre, mais il convient tout de même de les mentionner ici.

4.5.1. Subsidence

La subsidence consiste en l'affaissement de la surface du sol, qui peut aller de quelques centimètres à quelques mètres après plusieurs années. Il s'agit d'un phénomène lent, réparti sur de grandes superficies, qui se produit généralement lorsque les prélèvements d'eau souterraine excèdent la recharge naturelle (Abbasi et Abbasi, 2000; Bromley et al., 2015b; Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Gonzalez et al., 2015; Kagel et al., 2007; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Union of Concerned Scientists, 2015). Le plus souvent, la subsidence se produirait dans les secteurs tectoniquement actifs ou quand les réservoirs sont constitués de sables non consolidés, de silt, d'argiles ou de graviers (Bromley et al., 2015b; Kagel et al., 2007). L'affaissement peut affecter la stabilité des bâtiments dans le secteur, y compris celle des installations géothermiques. Certains auteurs affirment qu'on retrouve des preuves de subsidence dans pratiquement tous les secteurs où l'on produit de l'énergie géothermique, à des niveaux différents (Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003), alors que d'autres sont d'avis que la réinjection des fluides permet de maintenir la pression dans le système et d'éviter la subsidence (Massachusetts Institute of Technology, 2006). Par exemple, des affaissements de

sol d'environ 18cm par an ont été enregistrés au champ géothermal de Cerro Pietro, où il est connu que le volume de vapeur extraite dépasse largement la réinjection. La distribution spatiale et temporelle de la subsidence est liée à l'extraction de fluides géothermaux, et l'évolution de cette distribution correspond au développement du champ géothermique. Il apparaît que la subsidence serait contenue spatialement par un réseau de failles (Gonzalez et al., 2015). Un autre exemple connu, et probablement le plus frappant, de subsidence se trouve au site de Wairakei, en Nouvelle-Zélande, où ce phénomène a causé des affaissements de sol de plusieurs mètres (Bromley et al., 2015b). Le terrain y est traversé par une fracture naturelle profonde du système de la faille Alpine, ce qui contribue davantage au phénomène. La subsidence dans cette région a ainsi affecté les infrastructures, les chemins de fer, les canaux d'irrigation et les terrains dans les villages à proximité (Quintero-Nunez et al., 2015). Ce phénomène est irréversible, mais on peut en minimiser les effets en maintenant la pression dans le réservoir par réinjection. Toutefois, lorsque la subsidence est provoquée par la perte de chaleur entraînant une contraction des roches (contraction thermoélastique), elle ne peut être compensée par ce procédé (Kagel et al., 2007). Il peut toutefois être difficile de distinguer la subsidence induite de celle ayant lieu naturellement, particulièrement quand les activités ont lieu dans une zone active tectoniquement (Kagel et al., 2007).

La littérature indique donc que, lorsque la pression est maintenue dans le système par réinjection, comme dans le cas des centrales binaires, la subsidence peut généralement être gardée à un niveau minimal, voire nul. Ce procédé permet d'éviter des changements importants sur la morphologie en surface et ainsi de minimiser les impacts sur les infrastructures en place.

4.5.2. Séismicité

L'un des risques les plus craints lors de la construction des systèmes géothermiques ouvragés (EGS – Enhanced geothermal system) est celui d'accroître la séismicité localement. Il s'agit même, selon un rapport du MIT, du seul véritable enjeu (Massachusetts Institute of Technology, 2006). En effet, la stimulation d'un réservoir par fracturation hydraulique, les prélèvements d'eau ainsi que la réinjection de fluides peuvent accroître l'activité sismique locale (Cuenot et al., 2008; Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Jeffrey et al., 2015; Kagel et al., 2007; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Majer et al., 2007; Meier et al., 2015; Union of Concerned Scientists, 2015). Ceci se produit par de multiples processus hydro-mécaniques entre la circulation des fluides et les plans des failles, le plus souvent en

jouant sur la pression interstitielle (Cuenot et al., 2008; DiPippo, 1991; Majer et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Sasaki, 1998). Par exemple, le contact de fluides refroidis avec la roche ayant une chaleur plus élevée peut causer une contraction de la surface des fractures, provoquant éventuellement des glissements le long des failles. L'interaction entre les fluides refroidis et la roche chaude peut également créer des fractures et accroître la sismicité directement liée à la contraction thermique. De plus, à des pressions plus élevées, l'injection de fluides peut causer de nouvelles fractures dans la roche. Il est également possible que l'injection de fluides externes au système, et ayant donc des caractéristiques différentes des fluides originaires du milieu, cause des altérations chimiques sur les surfaces des failles, modifiant ainsi le coefficient de friction de ces surfaces (DiPippo, 1991; Majer et al., 2007; Rybach, 2003). La présence de fractures naturelles préexistantes semble jouer un rôle clé dans la conductivité et le risque d'un événement sismique (DiPippo, 1991; Huenges et al., 2013; Majer et al., 2007). Selon certaines études, l'évolution de la sismicité est souvent liée à la fréquence des injections (Cuenot et al., 2008). Certains auteurs suggèrent que les injections initiales perturbent le système et accroissent la sismicité, et qu'un équilibre se crée ensuite où l'activité sismique restera constante ou même décroîtra (Majer et al., 2007).

Il a ainsi été clairement démontré que l'injection augmente la fréquence des microséismes, soit des tremblements de terre de moins de 3 sur l'échelle de Richter, le plus souvent imperceptibles par les humains (Cuenot et al., 2008, 2008; Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Huenges et al., 2013; Kagel et al., 2007; Majer et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Rybach, 2003; Union of Concerned Scientists, 2015). Lors de tests d'injection préliminaires faits à Berlin, au Salvador, le nombre de microséismes a doublé durant les périodes d'injection (Majer et al., 2007). Le débat reste toutefois toujours ouvert par rapport à l'induction de tremblements de terre de plus grande ampleur par la fracturation hydraulique, les prélèvements d'eau et la réinjection. La corrélation entre les activités liées à la production d'électricité par géothermie et les séismes d'une magnitude plus grande que 3 sur l'échelle Richter est difficile à démontrer, car les centrales géothermiques sont souvent localisées dans des secteurs où l'on retrouve naturellement une activité sismique. Certains auteurs affirment que l'on ne peut écarter la possibilité que des séismes de plus grande ampleur soient déclenchés par l'injection (Cuenot et al., 2008; Meier et al., 2015), alors que d'autres suggèrent plutôt que la mise en place et l'opération

d'un système géothermique ouvrages n'ont que peu d'impact sur la fréquence des tremblements de terre de grande ampleur (Dickson et Fanelli, 2004; DiPippo, 1991; Huenges et al., 2013; Kagel et al., 2007; Majer et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Rybach, 2003; Union of Concerned Scientists, 2015). Le système géothermique ouvrage de Soultz-sous-Forêts, en France, est souvent cité à titre d'exemple : plus de 20 stimulations majeures y ont été complétées sans que l'activité sismique n'augmente considérablement (Huenges et al., 2013). Par ailleurs, des mesures prises aux installations du champ géothermique des Geysers, aux États-Unis, ont indiqué que l'activité sismique de faible ampleur a augmenté avec l'injection, mais que la fréquence des événements de plus grande ampleur est restée relativement stable depuis 1985, malgré les changements dans l'intensité de l'injection (Majer et al., 2007; Majer et Peterson, 2005). Certains auteurs affirment que, même lorsque les séismes dépassent 3 MI, ils ne causent normalement pas de dommages aux infrastructures construites, car la fréquence de ces tremblements de terre serait trop élevée ¹ (Baria et al., 2006; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Il n'y aurait donc aucun cas répertorié où il a été démontré

¹ "At present the damage criteria and perception of the inhabitants near a geothermal plant is to use seismological term for bigger events i.e. the Richter scale (ML) but this is not the case in mining, civil engineering and other industry. Peak particle acceleration and frequency are used for as the damage criteria. These are well-established criteria based on actual damage to building etc. This is important as a large proportion of the large events created during the creation of a geothermal system have large stress drop and higher frequencies. This means that although it may be annoying to hear and may even feel a tremor, it is unlikely to cause any damage to the majority of the man-made structures as the frequency is too high. Events like these may still register in the seismological scale in the range of 2.9 MI or more." (Baria et al., 2006)

"Typically, natural fractures vary in length on a scale of 1 to 10 meters. Seismic energy radiated during the shearing process depends on the length of the fracture or the stress release from the constraining natural forces. A majority of the observed data from existing EGS projects suggest that the higher energy radiated from the shearing is caused by a high stress release from relatively small joint lengths (Michelet et al., 2004). This would suggest that if there were some perceived events on the surface, the frequency content would be too high to generate any seismic risk, but minor events may still raise concerns among local inhabitants. »

qu'un séisme induit par des activités liées à la production d'électricité par géothermie ait eu des conséquences sur les constructions humaines (Majer et al., 2007; Meier et al., 2015).

Ces séismes peuvent toutefois créer des inquiétudes au sein de la population locale, par exemple à Landau, Allemagne, les pressions d'injection ont dû être réglementées à la suite de l'accroissement de l'activité sismique, qui inquiétait les communautés à proximité (Huenges et al., 2013). De plus, à Bâle, Suisse, un tremblement de terre de magnitude de 3.4 à proximité du puits d'injection, ayant provoqué des craintes au sein de la population locale, a conduit à la suspension des activités d'exploration pour la construction d'une centrale, malgré le fait qu'aucun dommage physique n'ait été causé (Majer et al., 2007). Il semblerait que les tremblements de terre de magnitude plus élevée se produiraient en bordure de la zone d'activité sismique et souvent après que l'injection n'ait cessé (Majer et al., 2007). Plusieurs auteurs mentionnent que les tremblements de terre dommageables se produiraient seulement dans les secteurs où l'on retrouve un système de failles développé ou des failles actives (Majer et al., 2007). Les facteurs déterminant la force des tremblements de terre ne sont pas encore bien identifiés, mais certaines études semblent indiquer que les événements sismiques majeurs (6 et plus sur l'échelle Richter) prennent leur origine à des profondeurs d'au moins 5-10 km, car c'est seulement à ces profondeurs que suffisamment d'énergie peut être emmagasinée pour déplacer les volumes de roche impliqués dans de tels événements. La force et la fréquence des tremblements de terre serait fonction de la quantité et de la fréquence des fluides injectés, de l'orientation du champ de contraintes par rapport à l'augmentation de la pression interstitielle, de l'ampleur du système local de failles et de la quantité de tension excessive disponible pour créer un tremblement de terre (Majer et al., 2007).

Certains auteurs proposent des mesures, ou des études, pour tenter de minimiser l'impact d'une centrale géothermique sur l'activité sismique locale. Huenges et al. (2013) proposent que des méthodes de stimulation « douces » soient développées afin de permettre d'augmenter le volume du réservoir tout en réduisant le risque de produire un tremblement de terre. De plus, des méthodes de suivi de l'activité sismique devraient être obligatoires et mises en place avant le début des activités. Celles-ci doivent inclure un réseau d'instruments de mesure efficace, un suivi en temps-réel de l'activité microsismique et une modélisation à chaque étape, de la fracturation jusqu'à l'opération. Ce suivi servira de base pour un système d'alerte précoce pour les séismes (Huenges et al., 2013; Meier et al., 2015; Rybach, 2003; Union of

Concerned Scientists, 2015). Meier et al. (2013) proposent quant à eux une stratégie en trois temps pour minimiser le risque sismique. D'abord, limiter le rayon des plans de fracture stimulés hydrauliquement à quelques centaines de mètres, pour réduire la sismicité induite. Ensuite, éviter les sites densément peuplés, ceux avec une activité sismique naturelle élevée et localiser le réservoir à une distance d'au moins un kilomètre de failles régionales ou majeures. Finalement, utiliser des modèles probabilistes pour évaluer la meilleure stratégie de développement. Dans le cas de Bâle, par exemple, la stimulation de plus petites zones de fractures en plusieurs stades aurait eu un meilleur profil de risque que la stimulation massive initialement prévue. Ce modèle est également utilisé dans le cadre d'un système d'alerte précoce, qui permet de stopper l'injection si la probabilité d'un séisme d'une certaine magnitude devient élevée (Meier et al., 2015). Par ailleurs, puisqu'il a été démontré que des failles préexistantes augmenteraient le risque de provoquer des événements sismiques de plus forte ampleur, des études géologiques et tectoniques devraient être réalisées avant la sélection d'un site afin de localiser les centrales géothermiques à des distances suffisantes de failles majeures (Majer et al., 2007; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Union of Concerned Scientists, 2015). Certains auteurs voient également dans la microsismicité induite par la stimulation d'un réservoir une opportunité pour faciliter le développement du réservoir. En effet, avec la technique appropriée, on pourrait stimuler un volume de roche plus important par la dilatation induite par les injections (Jeffrey et al., 2015).

Il apparaît donc que la production d'électricité par des systèmes géothermiques ouvragés provoque une augmentation de l'activité sismique de faible magnitude, mais que des études restent à faire pour démontrer et comprendre le lien entre les événements de plus grande ampleur et l'injection ou la réinjection de fluides. Il semble que la présence d'événements ressentis soit caractéristique des systèmes géothermiques ouvragés, mais aucune étude ne détaille le comportement sismique à long terme de ces systèmes (Majer et al., 2007). Quoi qu'il en soit, quelques mesures existent pour tenter de minimiser l'impact de la construction et de l'opération d'une centrale sur la sismicité d'une région, mais de plus amples travaux de recherche devraient être entrepris pour en proposer de nouvelles. En outre, il semble que, si les tremblements de terre induits par la production d'électricité géothermique n'auraient pas d'impact sur les structures bâties, ils peuvent causer des inquiétudes au sein de la population (Kagel et al., 2007). Il est donc essentiel d'impliquer la population

dans le processus décisionnel (Union of Concerned Scientists, 2015) et à tout le moins de l'informer tôt dans le projet des risques et des bénéfices de la mise en place d'une centrale géothermique.

4.5.3. Glissements de terrain

Un risque environnemental associé à la sismicité est celui d'induire des glissements de terrain. En effet, comme les activités liées à la production d'électricité par géothermie peuvent accroître l'activité sismique, il est également possible que, si les conditions sont favorables, ceci provoque des glissements de terrain. Il y a peu d'occurrences de ce genre d'événement, mais il reste essentiel d'effectuer une caractérisation géologique adéquate avant le début du projet et de localiser le site ainsi que les puits afin d'éviter toute interaction avec des failles existantes (Kagel et al., 2007; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006).

4.6. Perte de chaleur non renouvelable

La perte potentielle de chaleur non renouvelable est l'un des impacts possibles de la production d'énergie géothermique parmi les moins étudiés. De façon générale, le processus consiste à prélever une grande quantité d'eau chaude présente dans les formations profondes, ou préalablement injectée puis réchauffée. La chaleur sert ensuite à l'évaporation d'un autre fluide, puis l'eau refroidie est réinjectée dans le réservoir afin de rétablir la pression et d'être encore une fois réchauffée par la roche, puis réutilisée. Le remplacement de grands volumes d'eau chaude par des fluides refroidis ou provenant de la surface peut, à long terme, refroidir le système (Dickson et Fanelli, 2004; Quintero-Nunez et al., 2015; Rybach, 2003). Ce phénomène peut être provoqué par une surexploitation, comme c'est le cas au champ géothermique de Cerro Prieto, Mexicali, Mexique, où le réservoir est présentement en déclin (Quintero-Nunez et al., 2015). Il s'agit probablement du seul aspect où les centrales binaires présentent un plus grand impact par rapport aux autres types de centrale (Rybach, 2003). Selon l'International Geothermal Association, certains réservoirs sédimentaires et systèmes géothermiques ouvragés devraient donc être considérés comme des ressources non-renouvelables (Dickson et Fanelli, 2004). Certains modèles indiquent toutefois qu'après l'arrêt des opérations, le réservoir reviendrait à 95% de son état initial sur une échelle de temps semblable à celle du cycle de vie d'une centrale. Par contre, le retour à l'état originel du réservoir n'est théoriquement atteint qu'après une période de temps infinie (Bromley et al., 2015a; Gonzalez et al., 2015;

Rybach, 2003). Pour faire une meilleure gestion de la ressource, des plans indiquant des niveaux acceptables de production géothermiques à l'échelle nationale ou régionale pourraient être élaborés pour des périodes de temps définies, possiblement sur quelques centaines d'années, pendant lesquelles on modérerait les ouvertures et fermetures de centrales pour maintenir un niveau de production jugé durable (Dickson et Fanelli, 2004). La gestion durable du réservoir implique également de minimiser la baisse de température prématurée et le déclin de la pression avec des stratégies appropriées et flexibles de production et d'injection (Bromley et al., 2015a). Il apparaît que l'une des stratégies efficaces serait de développer progressivement en profondeur une ressource connue. Les connaissances acquises et le comportement simulé des premières étapes permet de planifier les forages plus profonds en les dirigeant dans les secteurs les plus appropriés et de diriger l'injection pour maximiser le maintien de la pression en minimisant la perte de chaleur prématurée (Bromley et al., 2015a).

5. Pollution thermique

La pollution thermique produite par la production d'énergie géothermique n'est que peu étudiée, mais il s'agit d'un impact bien réel de cette activité, qui est caractéristique des centrales géothermiques de tous types (Figure 4) (Abbasi et Abbasi, 2000; DiPippo, 1991; Gonzalez et al., 2015; Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003; Massachusetts Institute of Technology, 2006; Rybach, 2003). Il a été estimé qu'à Wairakei, en Nouvelle-Zélande, les rejets de chaleur de la centrale géothermique sont 6.5 fois plus élevés que ceux d'une centrale au charbon (Abbasi et Abbasi, 2000). Les tours de refroidissement permettent de réduire la température de la chaleur rejetée dans l'environnement. Toutefois, certains types de centrales laissent la chaleur s'échapper sous forme de vapeur, ce qui peut affecter la formation de nuages et modifier le climat localement. Il est connu que l'extraction d'eaux géothermales dans la région de Cerro Prieto et les émissions de chaleur et d'humidité dans l'atmosphère

ont un impact sur le climat régional (Gonzalez et al., 2015). De plus, l'eau usée, même traitée, déversée dans les rivières, les lacs ou les eaux souterraines peut avoir des impacts considérables sur les écosystèmes si sa température est plus élevée que la température naturelle de l'eau. En effet, une augmentation de la température d'une rivière de 2 degrés peut être suffisante pour y compromettre la survie de certaines espèces (Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003). Le refroidissement dans des bassins est possible, mais ce procédé n'est généralement pas recommandé car il peut entraîner une pollution chimique en cas de bris ou de déversement. Il est possible de réutiliser l'eau pour d'autres activités jusqu'à des températures assez faibles pour que son impact sur l'environnement soit minimisé. La meilleure solution reste toutefois la réinjection dans le réservoir; l'eau à température élevée n'entrera ainsi pas en contact avec les eaux superficielles (Kristmannsdóttir et Ármannsson, 2003).

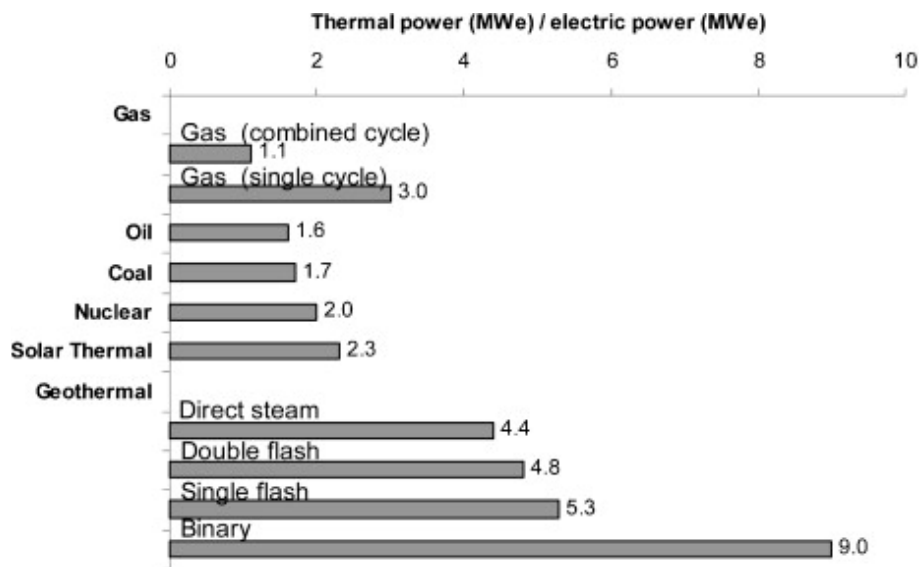


Figure 4 – Chaleur émise par unité d'énergie produite (tiré de Rybach, 2003).

6. Conclusion

Les impacts de la production d'énergie géothermique sur l'environnement naturels sont multiples, mais ils sont généralement faibles en comparaison des autres types de production d'énergie. Les étapes de test, de forage et de construction sont celles qui posent les risques les plus élevés pour le milieu environnant. Il convient donc de faire des études et de bien connaître les caractéristiques de celui-ci avant même de débiter les premières phases. Les impacts sur l'environnement physique, en particulier, devraient être mitigés, en mettant en place des mesures de contrôle de l'érosion, de gestion des déchets solides et de réduction du bruit. Il importe également de s'assurer de minimiser la perte de végétation à ce qui est absolument nécessaire et impliquer des experts pour s'assurer de mesures adéquates de remise en état.

Le Tableau 2 compare les impacts potentiels pour deux types de centrale géothermique. Le choix d'une centrale binaire permet de minimiser pratiquement tous les impacts liés aux opérations de la production d'énergie géothermique. En effet, les centrales binaires ne produisent pratiquement aucune émission dans l'atmosphère, les risques de déversement de substances potentiellement polluantes sont grandement diminués car les fluides restent en circuit fermé, les besoins en espace sont réduits car des bassins d'entreposage ne sont pas nécessaires et les pertes de chaleur dans l'environnement immédiat sont minimales car il n'y a aucun rejet d'eau ou de vapeur. Les risques qui demeurent, et qui ne sont pas nécessairement les moindres, sont liés à la sismicité,

au risque de contamination par accident ou à cause d'un équipement défectueux et à l'accumulation de déchets solides potentiellement toxiques. Il reste donc nécessaire de bien choisir l'emplacement de la centrale afin de réduire les impacts sur la sismicité, de travailler avec la population locale afin de bien l'informer des risques et des bénéfices de la production d'énergie par géothermie et de mettre en place un système de suivi de l'activité sismique en temps réel. De plus, un plan de mesures d'urgence doit être élaboré afin de réagir rapidement en cas d'accident. Les infrastructures et les équipements doivent être maintenus en bon état. Finalement, il convient d'avoir un plan de gestion des déchets solides dans le but d'assurer un entreposage et un traitement adéquat de ces substances.

En somme, des mesures relativement simples et connues existent pour minimiser les impacts potentiels de la production d'énergie géothermique sur l'environnement naturel, qui sont déjà, comparativement aux autres modes de production d'énergie, faibles. De plus, les centrales géothermiques sont particulièrement adaptables à leur milieu, et ont donc également des impacts facilement gérables sur l'aménagement du territoire. Il serait intéressant de développer les connaissances par rapport à la sismicité induite par les activités liées à la production d'électricité géothermique ainsi que par rapport à la perte de chaleur non-renouvelable. Néanmoins, il s'agit d'une source d'énergie particulièrement intéressante en regard de son intégration relativement harmonieuse dans son environnement.

Tableau 2 – Comparaison des impacts potentiels des centrales flash et binaire.

Impact potentiel	Type de centrale	
	Flash	Binaire
Impacts liés à la construction et à l'aménagement de la centrale	Possibilité de déversements accidentels; Contamination du sol et de l'eau par les rejets de forage; Grandes quantités d'eau nécessaires lors du forage et de la stimulation; Érosion du sol dû à l'abattage d'arbres; Production de déchets solides et liquides; Émission de gaz à effet de serre due à l'utilisation de diesel; Utilisation du sol accrue lors de la mise en place des équipements; Perte d'habitats; Bruits potentiellement nuisibles pour le voisinage (jusqu'à 115 dBA).	
Changements au paysage	Mise en place d'un équipement de taille considérable; Émission de vapeur	Faible, principalement le bâtiment
Bruit	Bruits ponctuels des séparateurs de vapeur	Généralement pas considéré comme une nuisance
Utilisation du sol	Grands espaces nécessaires pour les bâtiments et pour les bassins d'entreposage	Faible, principalement le bâtiment
Émissions dans l'atmosphère	Émissions potentielles de vapeur, dioxyde de carbone et sulfure d'hydrogène. Dans une moindre mesure : méthane, mercure, radon, ammoniac et bore	Négligeable ou nul
Utilisation d'eau	Grandes quantités nécessaires pour remplacer la vapeur perdue dans le processus	Négligeable
Détérioration de la qualité de l'eau	Risque de déversement en cas de bris d'équipement; Risque de contamination lors de l'entreposage, du traitement et du transport des eaux géothermales	Nul sauf en cas de bris d'équipement
Flore et faune	Transports de polluants dans l'air	Nul
Déchets solides	Faible risque provenant de substances dissoutes dans les fluides géothermaux	Négligeable ou nul
Subsidence	Potentiellement important, faible si on effectue une réinjection	Négligeable ou nul
Séismicité	Peut être accrue par la fracturation; les prélèvements d'eau et la réinjection	
Glissements de terrain	Associé à l'accroissement de la séismicité	
Perte de chaleur non renouvelable	Possible refroidissement du réservoir à long terme	
Pollution thermique	Rejet local de chaleur; Rejet potentiel d'eaux usées dans les cours d'eau; Modification du climat local par la formation de nuages	Rejet minimal de chaleur localement

Références

- Abbasi, S.A., Abbasi, N., 2000. The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Appl. Energy* 65, 121–144.
- Adaweh, A.B., Idleh, M.R., 2015. Project Evaluation of Geothermal Resources, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Agence internationale de l'énergie, 1998. *Benign energy?: the environmental implications of renewables*. OECD, Paris, France.
- Akella, A.K., Saini, R.P., Sharma, M.P., 2009. Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renew. Energy* 34, 390–396. doi:10.1016/j.renene.2008.05.002
- Aksoy, N., Gok, O.S., Mutlu, H., Kilinc, G., 2015. CO₂ Emission from Geothermal Power Plants in Turkey, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Baria, R., Majer, E.L., Fehler, M., Toksoz, N., Bromley, C., Teza, D., 2006. International cooperation to address induced seismicity in geothermal systems, in: *Proceedings*. Presented at the Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Bromley, C., Axelsson, G., Mongillo, M., 2015a. Sustainable and Environmental Environmental-Sound Development Strategies Addressed Through International Collaboration, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Bromley, C., Currie, S., Jolly, S., Mannington, W., 2015b. Subsidence: an Update on New Zealand Geothermal Deformation Observations and Mechanisms, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Clark, C.E., C.B. Harto, J.L. Sullivan, M.Q. Wang, 2011. *Water Use in the Development and Operation of Geothermal Power Plants*, Argonne National Laboratory, report ANL/EVS/R-10/5, Janvier 2011
- Cuenot, N., Dorbath, C., Dorbath, L., 2008. Analysis of the Microseismicity Induced by Fluid Injections at the EGS Site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): Implications for the Characterization of the Geothermal Reservoir Properties. *Pure Appl. Geophys.* 165, 797–828. doi:10.1007/s00024-008-0335-7
- Cuenot, N., Scheiber, J., Moeckes, W., Genter, A., 2015. Evolution of the Natural Radioactivity on the Soultz-sous-Forêt EGS Power Plant and Implication for Radiation Protection, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Dickson, M.H., Fanelli, M., 2004. *What is Geothermal Energy?*
- DiPippo, R., 1991. Geothermal energy Electricity generation and environmental impact. *Energy Policy* 19, 798–807. doi:10.1016/0301-4215(91)90050-X
- Frick, S., Kaltschmitt, M., Schröder, G., 2010. Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy* 35, 2281–2294. doi:10.1016/j.energy.2010.02.016
- Gonzalez, Z., Gonzalez, D., Kretzschmar, T., 2015. First Approach of Environmental Impact Assessment of CerroPrieto Geothermal Power Plant, BC Mexico, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Guo, M., Cheng, J., Ding, J., Wen, G., Liu, J., 2015. Economic and Environmental Evaluation of Using Low-Medium Temperature Geothermal Energy in Northern China, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Huenges, E., Kohl, T., Kolditz, O., Bremer, J., Scheck-Wenderoth, M., Vienken, T., 2013. Geothermal energy systems: research perspective for domestic energy provision. *Environ. Earth Sci.* 70, 3927–3933. doi:10.1007/s12665-013-2881-2
- Hydro-Québec, 2015. *Réservoirs | Barrages | Hydroélectricité | Hydro-Québec* [WWW Document]. URL <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydro-electricite/gestion-eau.html> (accessed 10.8.15).
- Jeffrey, R., Zhang, X., Jung, R., 2015. Reassessing Stimulation for EGS Reservoirs, in: *Proceedings*

- of the World Geothermal Congress 2015. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Juliusson, B.M., Gunnarsson, I., Matthiasdottir, K.V., Markusson, S.H., Bjarnason, B., Sveinsson, O.G., Gislason, T., Thorsteinsson, H.H., 2015. Tackling the Challenge of H₂S Emissions, in: Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Kagel, A., Bates, D., Gawell, K., 2007. A Guide to Geothermal Energy and the Environment. Geothermal Energy Association, Washington, D.C.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics* 32, 451–461. doi:10.1016/S0375-6505(03)00052-X
- Lacirignola, M., Blanc, I., 2013. Environmental analysis of practical design options for enhanced geothermal systems (EGS) through life-cycle assessment. *Renew. Energy* 50, 901–914. doi:10.1016/j.renene.2012.08.005
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics* 36, 185–222. doi:10.1016/j.geothermics.2007.03.003
- Majer, E.L., Peterson, J.E., 2005. Application of Microearthquake Monitoring for Evaluating and Managing the Effects of Fluid Injection at Naturally Fractured EGS Sites. *GRC Trans.* 29, 103–108.
- Massachusetts Institute of Technology (Ed.), 2006. The future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century: an assessment. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Meier, P.M., Rodriguez, A.A., Bethmann, F., 2015. Lessons Learned from Basel: New EGS Projects in Switzerland Using Multistage Stimulation and a Probabilistic Traffic Light System for the Reduction of Seismic Risk, in: Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Mutia, T.M., Simboyi, H., 2015. Environmental Audit Score-Card for Menengai Geothermal Project, Kenya: 2011-2013, in: Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Quintero-Nunez, M., Simbro, M.E., Canales-Rodriguez, M.A., Garcia-Cueto, O.R., Santillan-Soto, N., Ojeda-Benitez, S., Velazquez-Limon, N., 2015. A Comparative Study on the Environmental Impacts of a Binational Geothermal System: Imperial Valley, CA., U.S.A. and Cerro Prieto, Mexicali Valley, BC, México, in: Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Rybach, L., 2003. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics* 32, 463–470. doi:10.1016/S0375-6505(03)00057-9
- Sasaki, S., 1998. Characteristics of microseismic events induced during hydraulic fracturing experiments at the Hijiori hot dry rock geothermal energy site, Yamagata, Japan. *Tectonophysics* 289, 171–188.
- Union of Concerned Scientists, 2015. Environmental Impacts of Geothermal Energy [WWW Document]. Union Concernes Sci. - Sci. Healthy Planet Safer World. URL http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-geothermal-energy.html#.VQh2Eo54qX8 (accessed 3.17.15).
- US Department of Energy, 2015. Electricity Generation | Department of Energy [WWW Document]. URL <http://energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation> (accessed 10.8.15).