

## 13. Énergie géothermique

### 13.5 – Géothermie à haute énergie

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Pierre-Luc Paradis, B.Ing, M.Ing, Ph.D.

Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.

Mathieu Patin, M. Sc.A., Chercheur

Patrick Turcotte, Ing. Chercheur

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Différentes ressources géothermiques à haute énergie
- Coûts de la géothermie à haute énergie
- Projets de géothermie à haute énergie
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Généralités
- Différentes ressources géothermiques à haute énergie
- Coûts de la géothermie à haute énergie
- Projets de géothermie à haute énergie
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- La géothermie haute énergie cherche à générer de l'électricité, et non uniquement de la chaleur;
- Il faut pour cela passer par un fluide thermodynamique qui, le plus souvent, sera injecté dans une turbine actionnant un générateur;
- Ce processus demande des températures très élevées ( $>150^{\circ}\text{C}$ ), et donc généralement d'extraire la chaleur en profondeur;
- Sauf dans de rares exceptions, plus profond est le puits, plus intéressant est le gisement, mais plus coûteuse sera l'installation.

# Introduction et objectifs

- Objectifs
  - Étudier sommairement le fonctionnement et les particularités des systèmes à haute énergie;
  - Présenter les différentes ressources utilisables et leurs caractéristiques;
  - Expliquer pourquoi la haute énergie est le type de géothermie pour lequel la recherche est la plus active en ce moment.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Généralités***
- Différentes ressources géothermiques à haute énergie
- Coûts de la géothermie à haute énergie
- Projets de géothermie à haute énergie
- Enjeux environnementaux liés aux forages
- Conclusion

# Question

- Quel gradient de température devrait-on trouver habituellement dans le sol pour une ressource de qualité en géothermie profonde
  - A. Une augmentation de 9 à 11°C tous les 100 m de profondeurs
  - B. Une augmentation de 2 à 3°C tous les 1000 m de profondeurs
  - C. Une augmentation de 2 à 3°C tous les 100 m de profondeurs
  - D. Une diminution de 2 à 3°C tous les 100 m de profondeurs
  - E. Une diminution de 9 à 10°C tous les 100 m de profondeurs



ENR2020

# Généralités

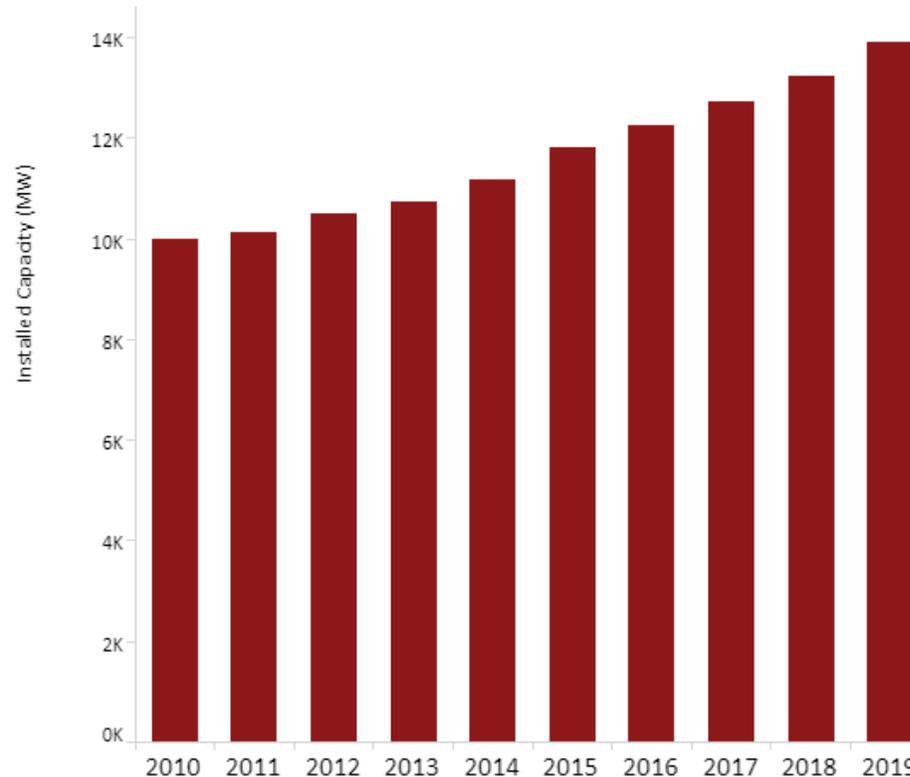
- Facteurs-clés à considérer pour l'exploitation:
  - Qualité de la ressource.
    - Gradient de température (z étant la profondeur) ,  $\frac{\partial T}{\partial z}$ , 2-3°C / 100m
      - Valeur typique change selon le lieu et la profondeur (voir 13.1, page 11)
    - Stabilité des formations rocheuses
      - Il faut choisir des lieux relativement insensibles aux activités sismiques notamment
    - Porosité
      - Certaines technologies fonctionnent avec un sol poreux et d'autres non

# Généralités

- Facteurs-clés à considérer pour l'exploitation:
  - Qualité du réservoir.
    - Taille et température
      - Les plus élevés possibles
    - Conductivité hydraulique (similaire à celle de la chaleur)
      - Il faut pouvoir assurer la puissance d'extraction de chaleur requise par la charge
  - Facteurs économiques.
    - Accessibilité, coût de forage
      - Le site en surface mais surtout le forage peuvent avoir une influence déterminante sur le coût global d'un projet
    - Coût de distribution
      - Comme pour les projets hydrauliques, il ne faut pas négliger l'infrastructure de transport pour acheminer l'électricité produite.

# Généralités

- Capacité de production (puissance installée)

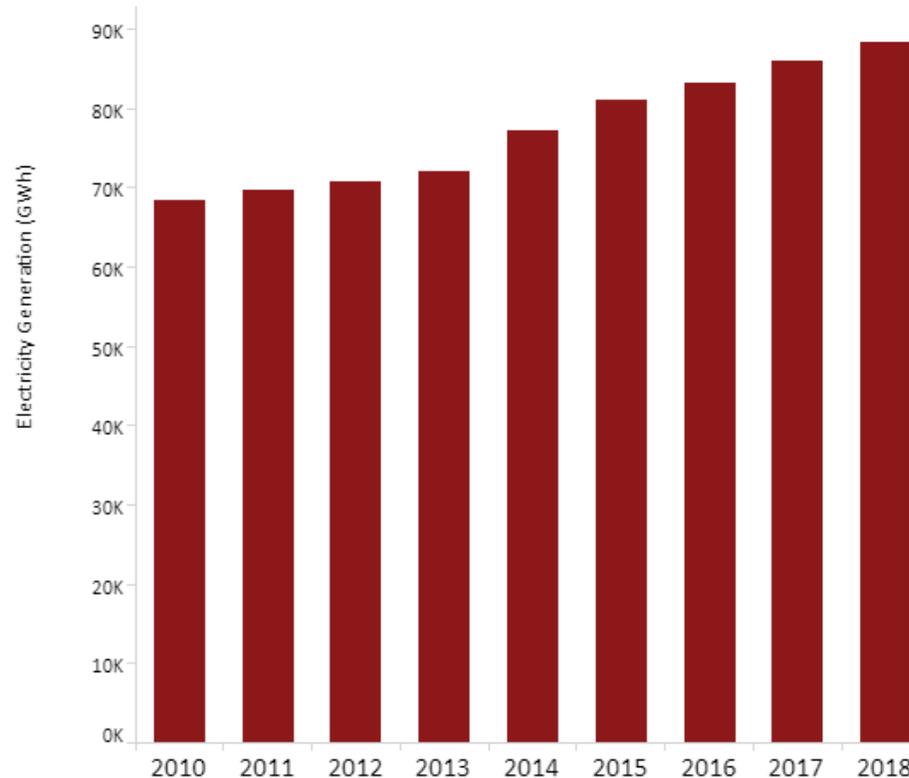


On constate une constante augmentation mais un ordre de grandeur de la capacité installée de loin inférieur à ceux du solaire PV ou de l'éolien, par exemple

Source: IRENA 2021, <https://www.irena.org/geothermal>

# Généralités

- Production électrique annuelle



La production électrique est en phase avec la capacité installée. Compréhensible puisque la production électrique est beaucoup plus constante qu'avec des sources intermittentes.

Le rapport GWh/GW est donc plus élevé.

Source: IRENA 2021, <https://www.irena.org/geothermal>

# Généralités

- Capacité de production électrique en 2018/2019

POWER			
Renewable power capacity (including hydropower)	GW	2,387	<b>2,588</b>
Renewable power capacity (not including hydropower)	GW	1,252	<b>1,437</b>
 Hydropower capacity <sup>2</sup>	GW	1,135	<b>1,150</b>
 Wind power capacity	GW	591	<b>651</b>
 Solar PV capacity <sup>3</sup>	GW	512	<b>627</b>
 Bio-power capacity	GW	131	<b>139</b>
 Geothermal power capacity	GW	13.2	<b>13.9</b>
 Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	GW	5.6	<b>6.2</b>
 Ocean power capacity	GW	0.5	<b>0.5</b>

Sans être marginale, la capacité installée est parmi les plus faibles des EnRs.

Source: REN21, Global status report 2020

# Généralités

- Capacité et production électrique en 2015

Production d'électricité par géothermie (2015)		
Pays	Puissance Installée [MWe]	Production [GWh/an]
Total	12 729	73 689
États-Unis	3 450	16 600
Philippines	1 870	9 646
Indonésie	1 340	9 600
Mexico	1 058	6 071
Nouvelle-Zélande	1 005	7 000
Italie	916	5 660

Source: R Bertani, Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report, Geothermics, 41, 1-29.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- ***Différentes ressources géothermiques à haute énergie***
- Coûts de la géothermie à haute énergie
- Projets de géothermie à haute énergie
- Enjeux environnementaux liés aux forages
- Conclusion

# Différentes ressources géothermiques

- La ressource énergétique d'origine géothermique est généralement divisée en quatre catégories:
  - *Hydrothermale*: Exploitation directe de la chaleur en puisant l'eau chaude dans des couches à grande profondeur.
  - *Géopressurisée*: Utilisation d'eau sous haute pression emprisonnée dans des couches sédimentaires étanches.
  - *Roche sèche*: Exploitation de la chaleur des roches qui ne contiennent pas (ou peu) d'eau à l'aide d'un fluide caloporteur.
  - *Magma*: Exploitation de la chaleur du magma à l'aide d'un fluide caloporteur.

# Différentes ressources géothermiques

- Ressource mondiale

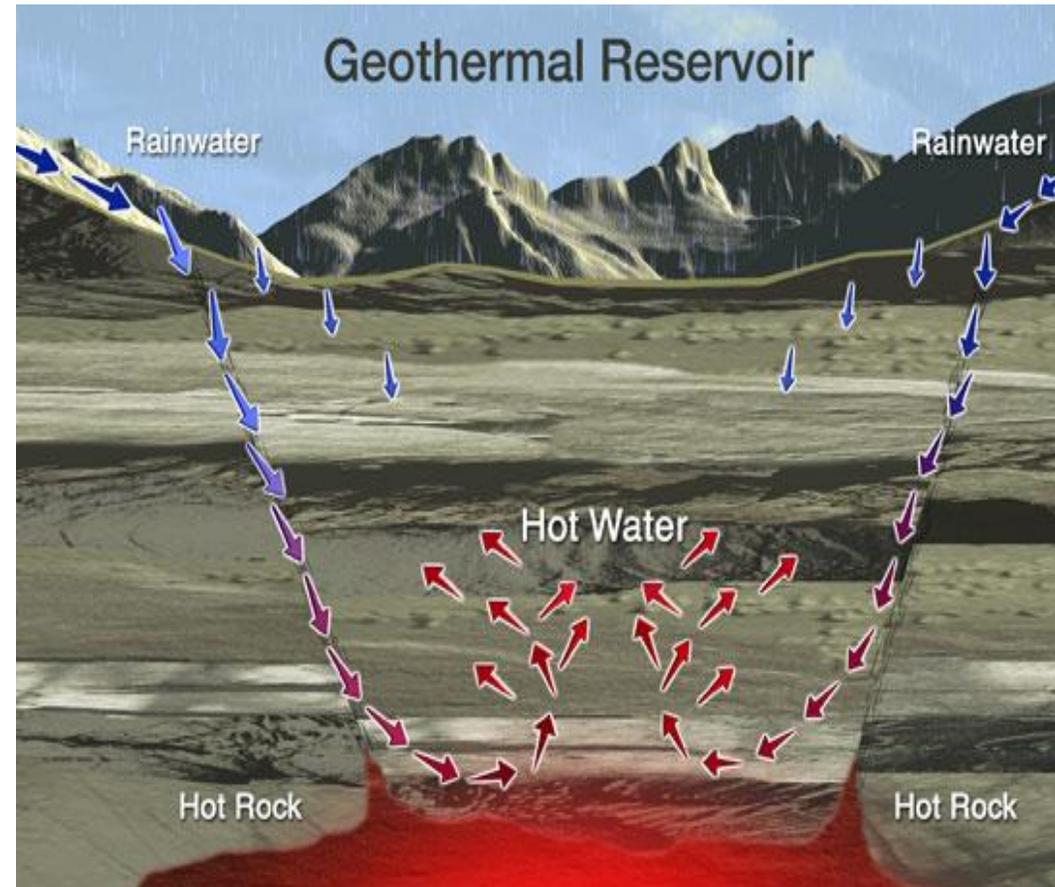
Type	Total (EJ)
Hydrothermale	130
Géopressurisée (0 à 10 km)*	540
Magma (0 à 10 km)	5 000
Roche sèche ( $\nabla T < 40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )	78 500
Roche sèche ( $\nabla T > 40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )	26 500

Note de cours: Stéphane Hallé, ÉTS, 2010 (Basé sur Boyle, Ren. Energy, 2004,

\*Capacité de forage actuelle: 12 km

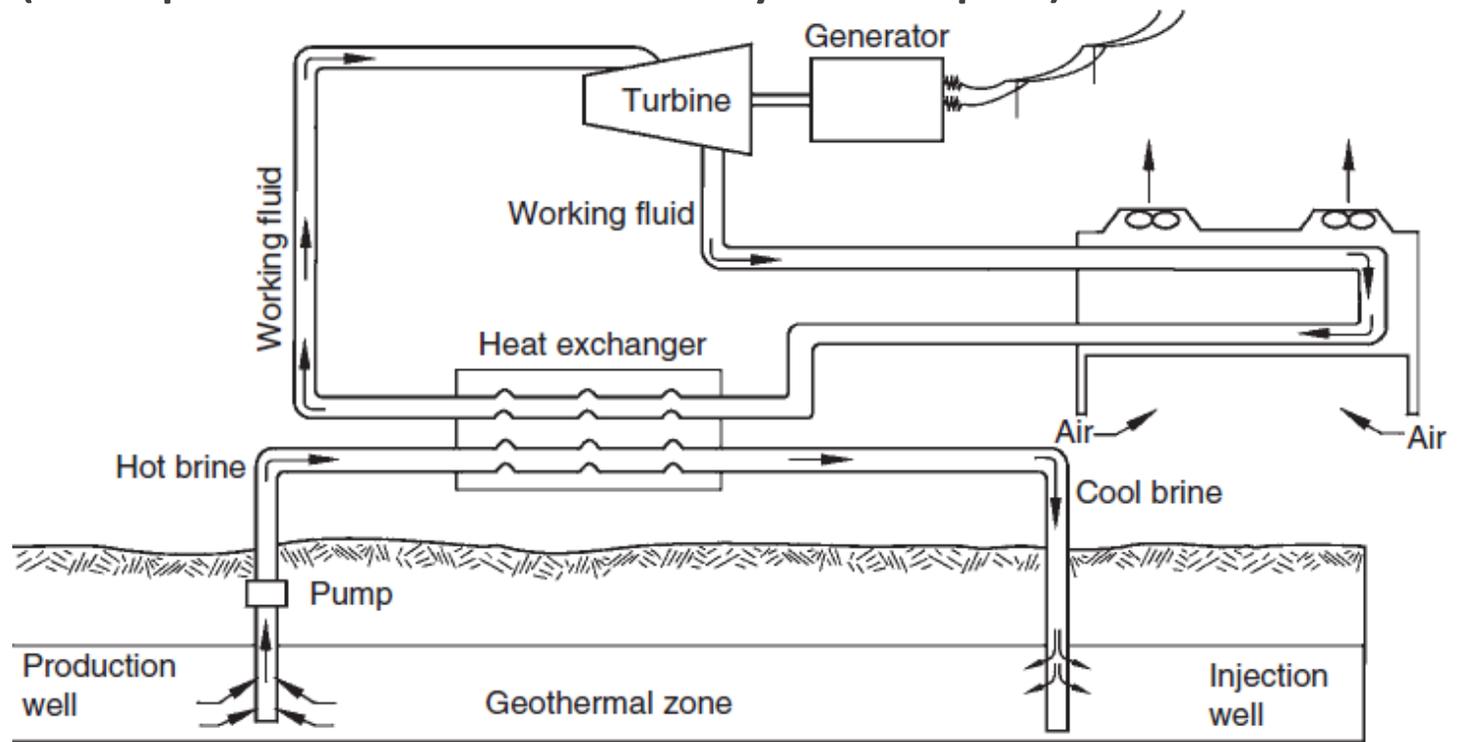
# Différentes ressources géothermiques

- Hydrothermale (1<sup>er</sup> type)
  - Extraction d'eau chauffée par les ressources géothermiques;
  - Peut aussi être un réservoir de vapeur;
  - Limité en termes d'endroits où la chose est possible.



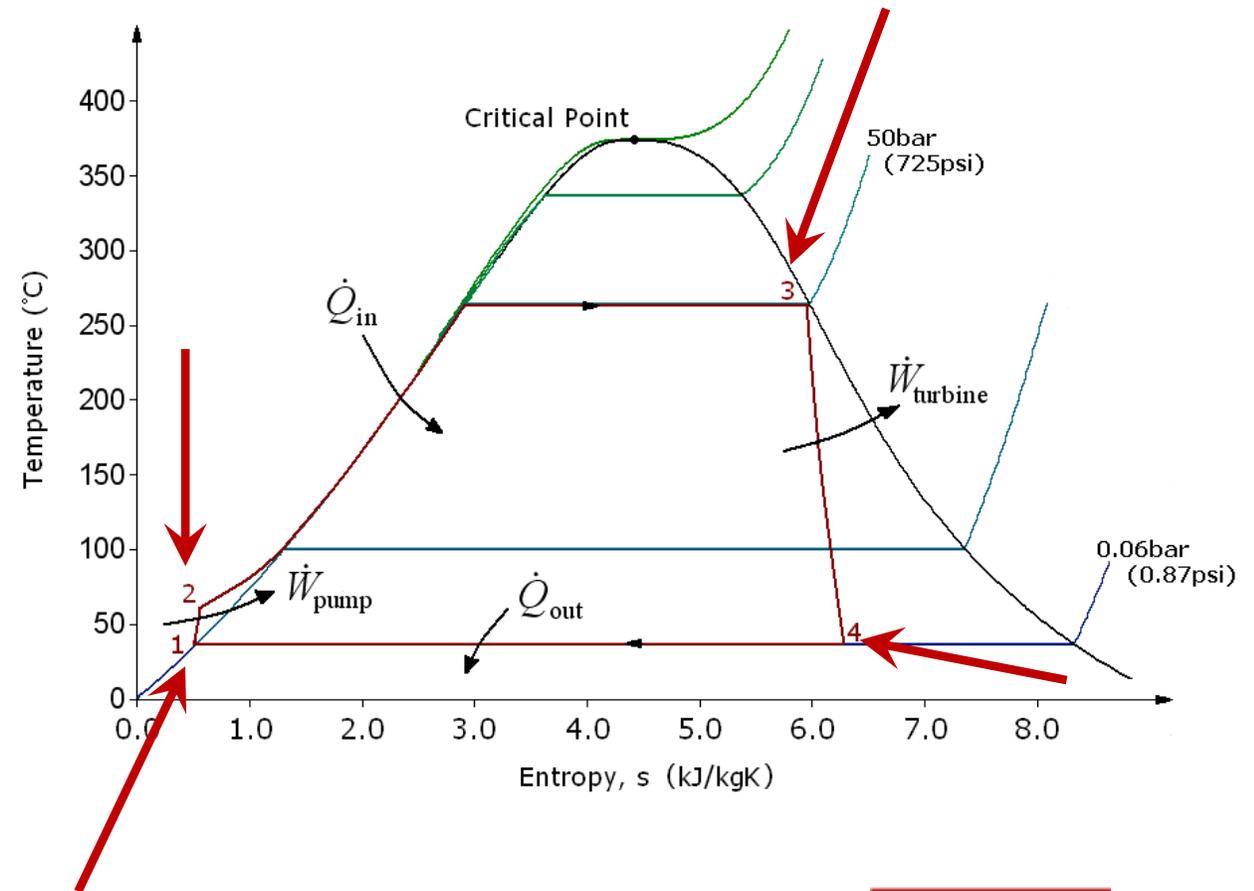
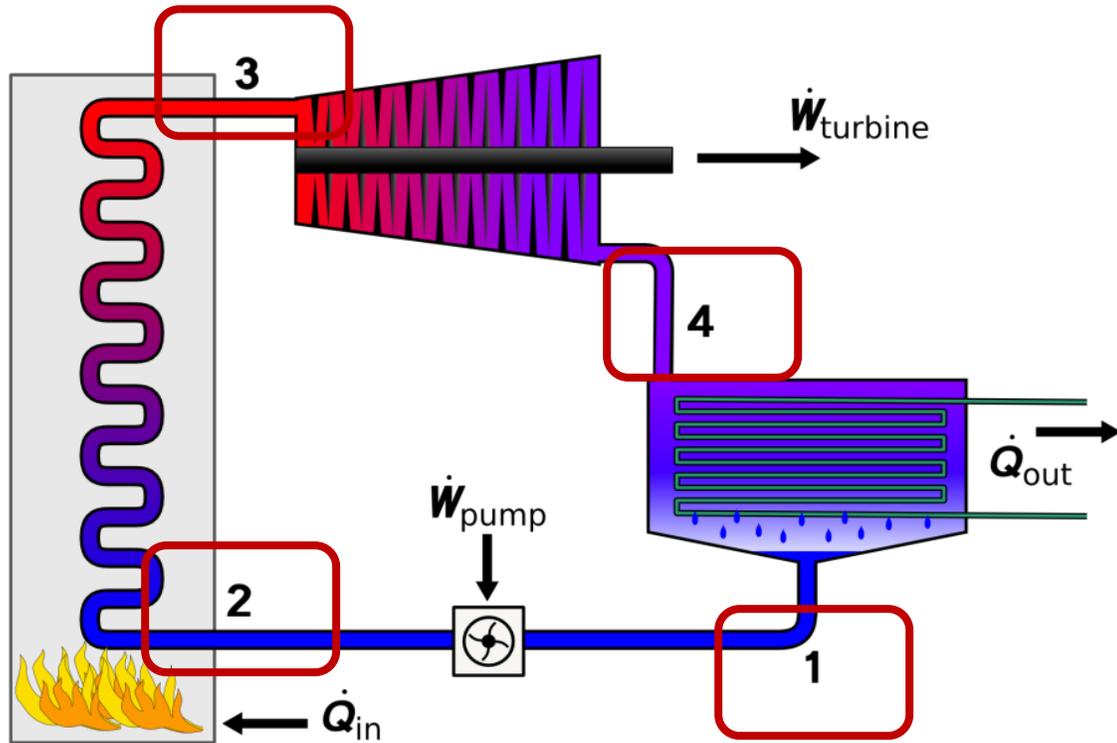
# Différentes ressources géothermiques

- Hydrothermale (1<sup>er</sup> type)
  - Système à deux fluides (caloporteur et thermodynamique)
  - Échangeur requis
  - Clairement



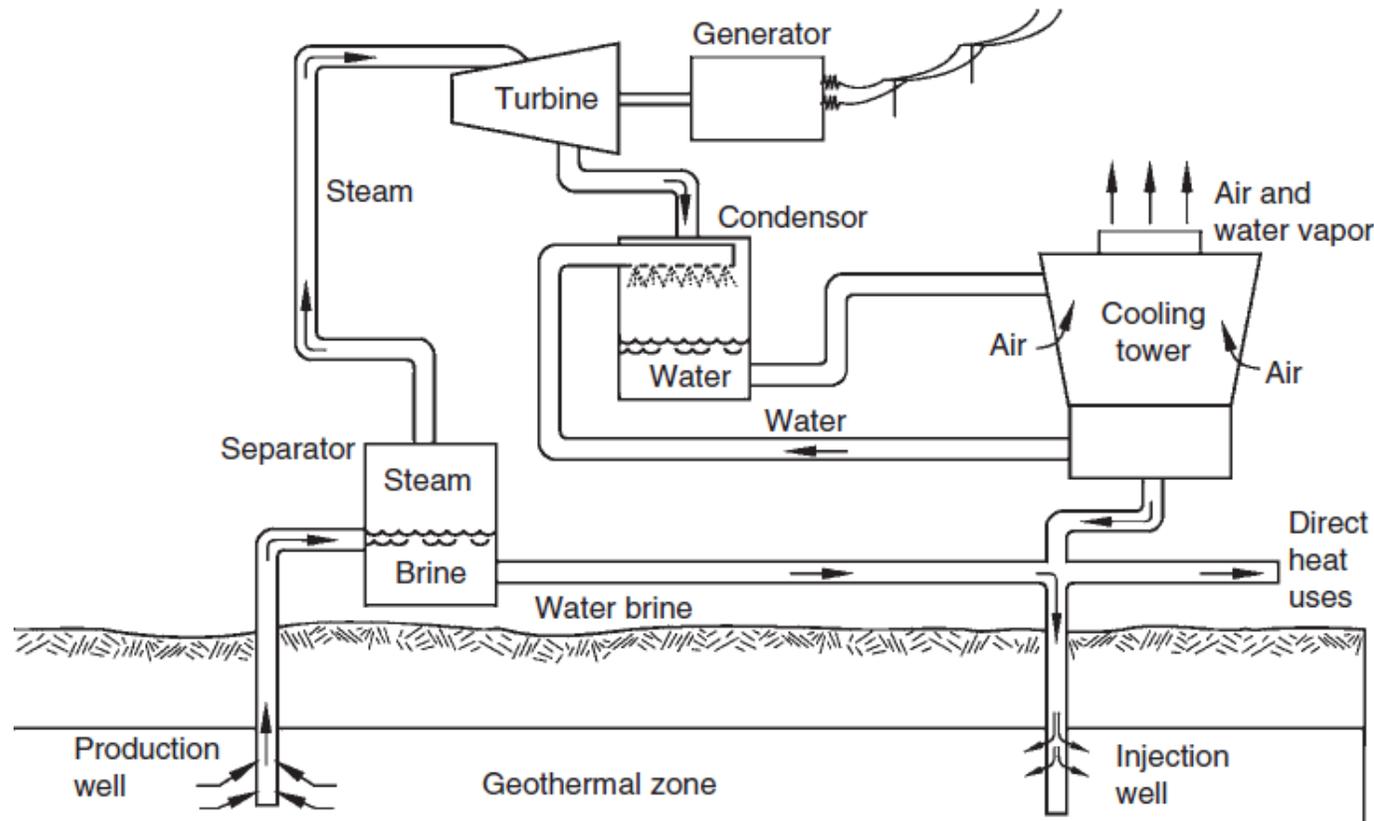
# Différentes ressources géothermiques

- Hydrothermale (1<sup>er</sup> type) cycle de Rankine



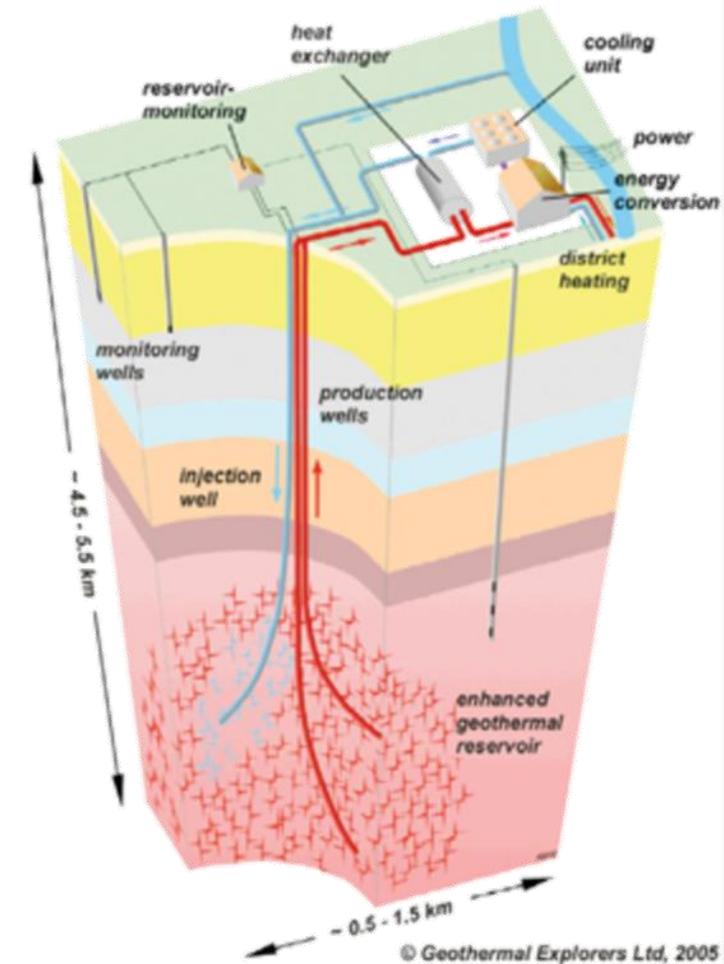
# Différentes ressources géothermiques

- Hydrothermale (1<sup>er</sup> type)
  - Cycle à vaporisation instantanée « flash »



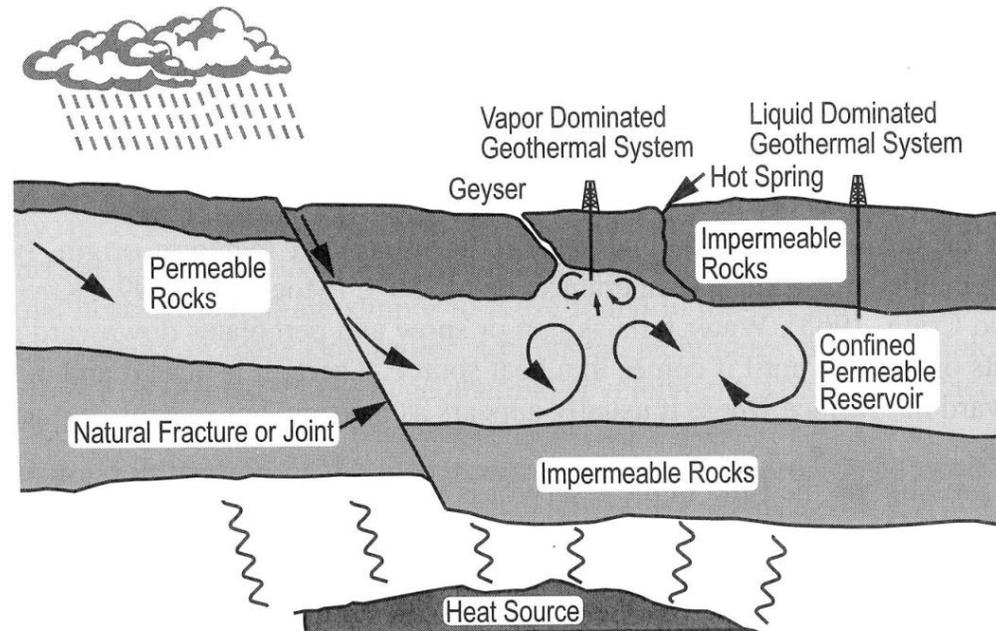
# Différentes ressources géothermiques

- Géopressurisée (2<sup>e</sup> type)
  - Réservoirs de sédiments qui emprisonnent un fluide sous **haute pression** à des températures généralement comprises entre 150 et 190°C;
  - La pression de certains réservoirs peut atteindre **70 MPa**;
  - Présence de méthane en solution;
  - Haute teneur en sels dissous (100 000 ppm);
  - Localisés entre 2 et 9 km.



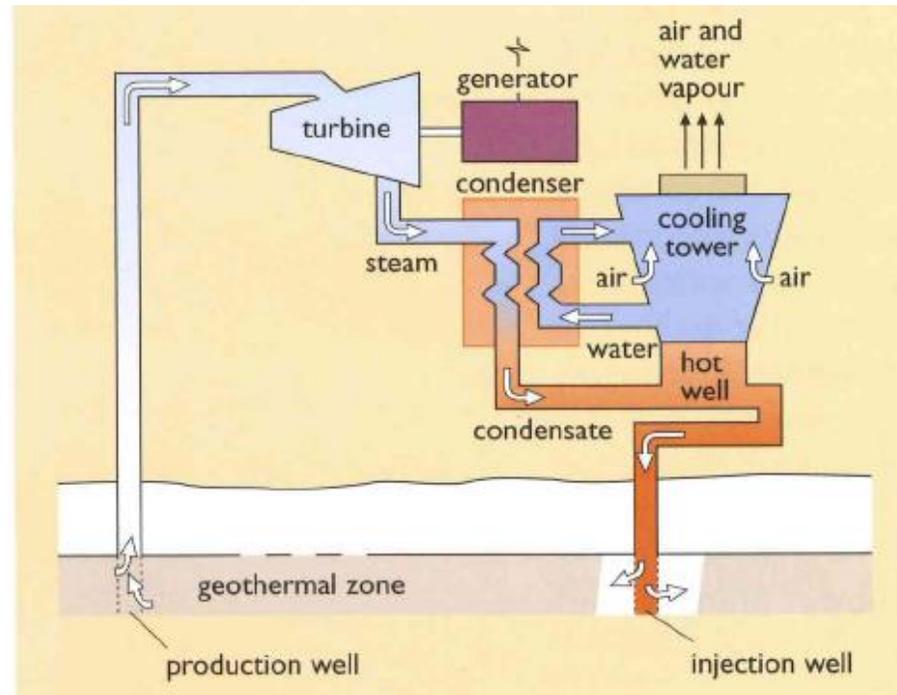
# Différentes ressources géothermiques

- Géopressurisée (2è type)
  - Ces systèmes rejettent spontanément un fluide à haute énergie (transfert de chaleur dominé par la convection).
  - Fréquemment localisés dans les zones d'activité volcanique ou tectonique.



# Différentes ressources géothermiques

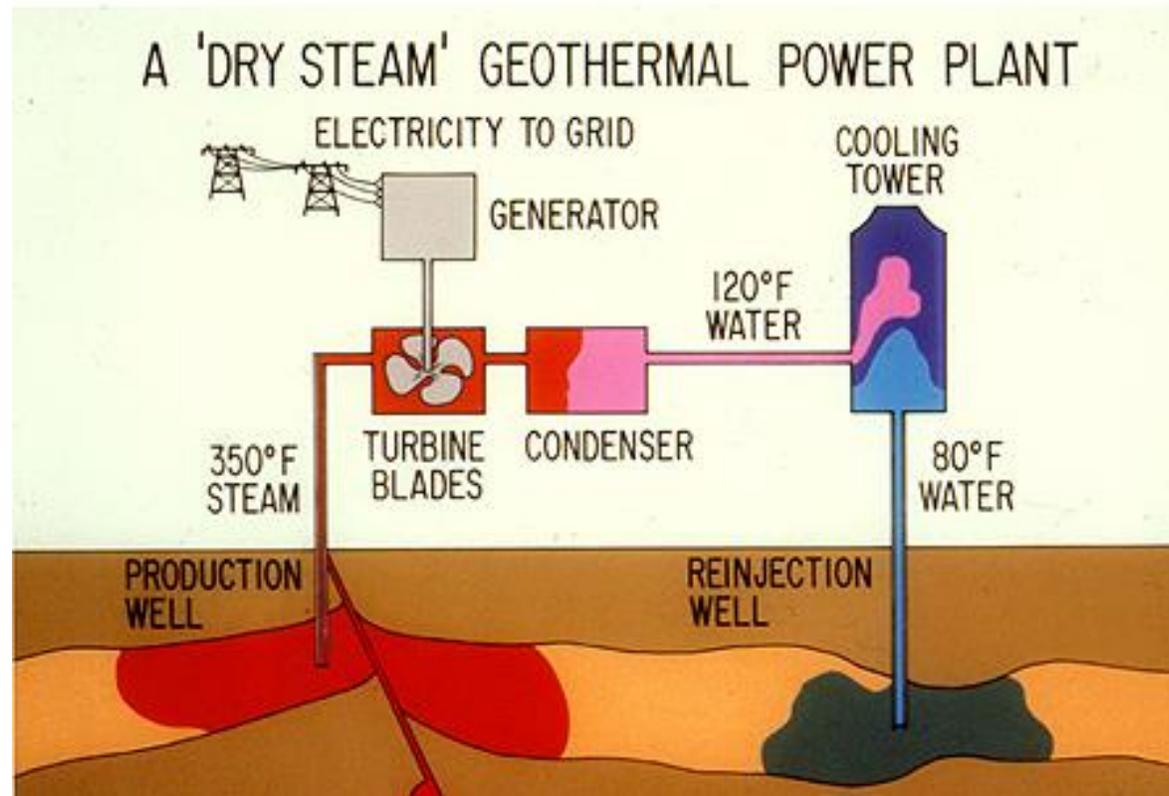
- Géopressurisée (2<sup>e</sup> type)
  - Haute enthalpie (génération par vapeur sèche)
    - L'eau arrive directement sous forme de vapeur haute pression et passe dans la turbine (cycle de Rankine)



Source: Godfrey Boyle Renewable Energy , Power for a sustainable Future. Oxford Press(2004)

# Différentes ressources géothermiques

- Géopressurisée (2è type)
  - Cycle à vapeur surchauffée



# Différentes ressources géothermiques

- Roche sèche (3è type)
  - Formation rocheuse à haute énergie (>200°C), mais **ne contenant pas** une quantité significative de fluide (faible perméabilité et porosité);
  - Transfert de chaleur dominé par la conduction;
  - Disponible sur toute la surface du globe;
  - Donc, le type **le plus commun** de géothermie profonde;
  - La difficulté réside dans la recherche de larges surfaces pour réaliser les transferts entre la roche et le fluide qui doit être injecté.

# Différentes ressources géothermiques

- Roche sèche (3è type)
  - Extraction de chaleur possible par un puits d'injection et un puits d'extraction;
  - Ex: Production électrique ( $T_{\text{vapeur, min}} \cong 150 \text{ }^\circ\text{C}$ );
  - $\nabla T \cong 25 \text{ }^\circ\text{C/km}$ , forage de 6 km, valeur type;
  - $\nabla T \cong 60 \text{ }^\circ\text{C/km}$ , forage de 2,5 km, valeur type.

# Différentes ressources géothermiques

- Magma (4<sup>e</sup> type)
  - Roche complètement ou partiellement fondue;
  - Possibilité de produire:  $H_2$ ,  $CH_4$  et  $CO$  à partir d'eau, de biomasse et de basalte à  $600^\circ C$ ;
  - Plusieurs contraintes d'ordre technique:
    - Température de l'ordre de  $650$  à  $1\ 300^\circ C$ ;
    - Profondeur de  $7$  à  $10$  km ( $\sim 3$  km sous certains volcans actifs);
    - Environnement corrosif.
  - La catégorie la **moins commune** car la plus complexe.

# Différentes ressources géothermiques

- Quelques fluides thermodynamiques employés:
  - R-600a (isobutane)
  - R-32 (CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)
  - Eau-ammoniaque
  - R-114 (C<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)
  - R-115 (C<sub>2</sub>ClF<sub>5</sub>)
- Facteurs à considérer:
  - Propriétés thermodynamiques
  - Stabilité chimique
  - Inflammabilité
  - Toxicité
  - Compatibilité (matériaux)
  - Coûts

**Après ce tour d'horizon des différentes ressources, quel est le cycle thermodynamique le plus utilisé?**

# Question

- Selon vous, quel est le principal frein au développement de la production d'électricité par géothermique haute énergie ?
  - A. Le coût des forages
  - B. Le manque de ressource disponibles
  - C. Les faibles performances des cycles thermodynamiques utilisés
  - D. L'invariance de la source
  - E. Aucune de ces réponses



ENR2020

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Différentes ressources géothermiques à haute énergie
- ***Coûts de la géothermie à haute énergie***
- Enjeux environnementaux liés aux forages
- Projets de géothermie à haute énergie
- Conclusion

# Coûts

- Les coûts de forage augmentent de façon exponentielle avec la profondeur ( $z$  en mètres);
  - Coût approximatif:  $0,2 * e^{0,00075*z}$  millions USD
  - Les coûts de production diminuent linéairement avec la température du réservoir;
  - Un point d'équilibre peut être déterminé entre les coûts de forage et les coûts de production;
  - Les coûts de construction en surface et les coûts de transport de l'électricité produite sont les autres coûts principaux à considérer;
  - Voir exercice 13.5 sur le sujet.

# Coûts

- Les coûts de forage augmentent de façon exponentielle avec la profondeur ( $z$  en mètres);
  - Coût approximatif:  $0,2 * e^{0,00075*z}$  millions USD
- Pour obtenir un ordre de grandeur de ces coûts, on demande:
  - Quel serait le coût de forage d'un puits de 5 000 m en CAD\$?
    - $C_{USA} = 0.2 * \exp(0.00075 * 5000) = 8.504$  millions de US\$
    - $C_{CAN} = C_{USA} * 1.26477$  (taux de change)  $\approx 10-11$  millions de CAD\$
  - C'est de l'ordre de grandeur de TOUS les autres coûts, voire +
  - D'où l'avantage de choisir un site où l'énergie affleure la surface, ou presque.

# Coûts

- Coûts des installations

Source:

[https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP\\_Geothermal%20Handbook\\_FRENCH.pdf](https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP_Geothermal%20Handbook_FRENCH.pdf)

**TAB LEAU 1.6**

Coûts indicatifs du développement géothermique (capacité de 50 MW à la sortie du générateur), en millions US

PHASE / ACTIVITÉ	ESTIMATION BASSE	ESTIMATION MOYENNE	ESTIMATION HAUTE
1 Étude préliminaire, permis, analyse de marché <sup>16</sup>	1	2	5
2 Exploration <sup>17</sup>	2	3	4
3 Forages pilotes, tests de puits, évaluation de réservoir <sup>18</sup>	11	18	30
4 Étude de faisabilité, planification de projet, financement, contrats, assurances, etc. <sup>19</sup>	5	7	10
5 Forages (20 trous de forage) <sup>20</sup>	45	70	100
6 Construction (centrale, refroidissement, infrastructure, etc.) <sup>21</sup>	65	75	95
Système de collecte de vapeur et sous-station, raccordement au réseau (lignes de transport) <sup>22</sup>	10	16	22
7 Démarrage et mise en exploitation <sup>23</sup>	3	5	8
<b>TOTAL</b>	<b>142</b>	<b>196</b>	<b>274</b>
En millions US par MW installé	2,8	3,9	5,5

L'une des premières installations à Soutz-sous-Forêts a coûté 80€/W

Source | Auteurs.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Différentes ressources géothermiques à haute énergie
- Coûts de la géothermie à haute énergie
- ***Enjeux environnementaux liés aux forages***
- Projets de géothermie à haute énergie
- Conclusion

# Enjeux environnementaux liés aux forages

Outre les enjeux économiques qui sont liés au forage, il y a les enjeux environnementaux. En voici quelques uns :

- 1. Émissions de gaz toxiques** : le forage peut entraîner la libération de gaz toxiques dans l'atmosphère, tels que le méthane et le soufre.
- 2. Pollution de l'eau** : le forage peut entraîner la contamination de la nappe phréatique par des produits chimiques utilisés dans le processus de forage, tels que les lubrifiants et les agents de nettoyage.

# Enjeux environnementaux liés aux forages

**3. Tremblements de terre** : le forage peut provoquer de petits tremblements de terre, en particulier lorsqu'il est effectué à proximité de failles sismiques actives.

Il s'agit, 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.

<https://espace.inrs.ca/id/eprint/3346/1/R1650.pdf>

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Différentes ressources géothermiques à haute énergie
- Coûts de la géothermie à haute énergie
- Enjeux environnementaux liés aux forages
- ***Projets de géothermie à haute énergie***
- Conclusion

# Projets

- En France

## L'Alsace championne de la géothermie profonde

CORRESPONDANTE À STRASBOURG HÉLÈNE DAVID - LES ECHOS | LE 19/06/2017



# Projets

- En France



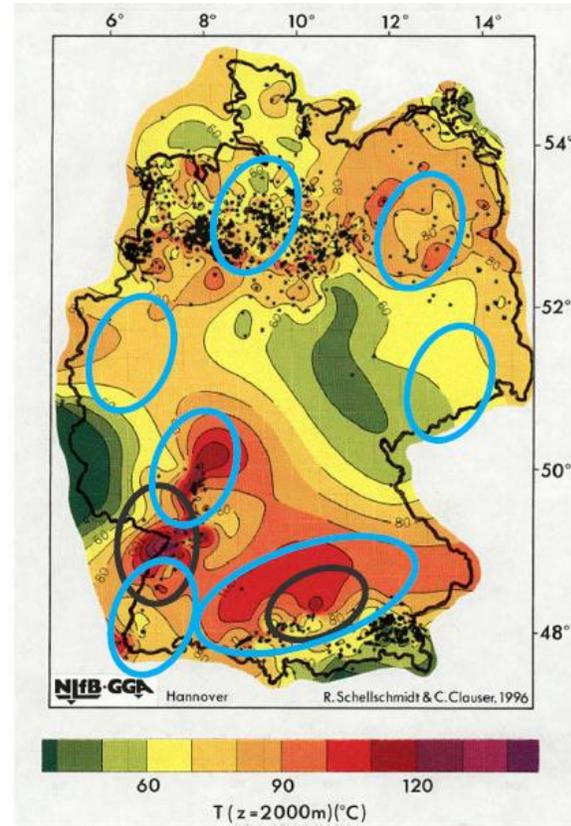
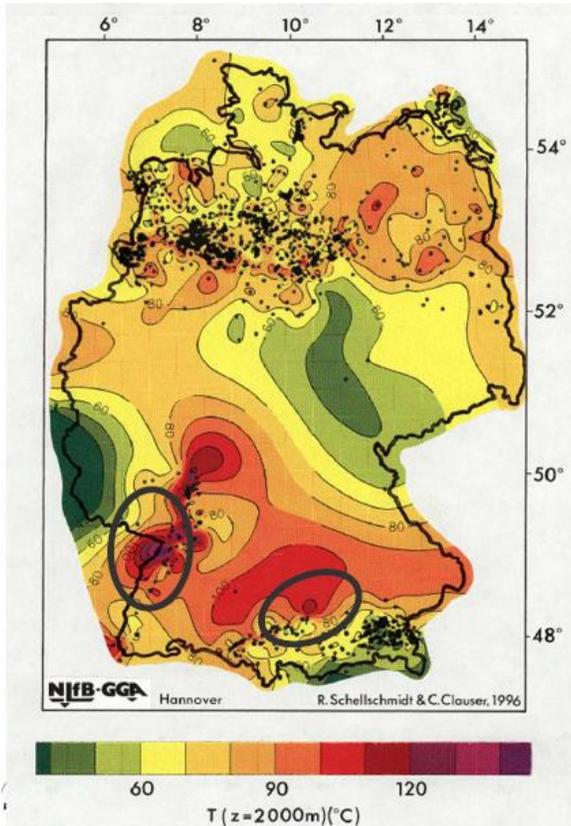
The screenshot shows the top portion of a Le Monde article. At the top center is the 'Le Monde' logo in a black, gothic-style font. To its left is a link 'Consulter le journal' and to its right is a 'Se connecter' button with a user icon. Below the logo is a horizontal navigation bar with several categories: 'ACTUALITÉS', 'ÉCONOMIE', 'VIDÉOS', 'OPINIONS', 'CULTURE', 'M LE MAG', and 'SERVICES', each with a small downward arrow. Underneath this bar, the article's category 'PLANÈTE • SCIENCES' is displayed on the left, and social sharing icons for Facebook, email, and a general share icon are on the right. The main headline is 'Après deux nouveaux séismes au nord de Strasbourg, la géothermie en question'. Below the headline is a short summary: 'Plusieurs épisodes sismiques ont eu lieu dans la région ces dernières semaines, provoquant l'arrêt d'un projet de géothermie, pilier de la transition énergétique en Alsace.' At the bottom of the article preview, it says 'Le Monde avec AFP', the publication date 'Publié le 04 décembre 2020 à 10h18', the update date 'Mis à jour le 04 décembre 2020 à 15h30', and the reading time 'Lecture 4 min'.

[Lien vers l'article complet](#)

[Autre lien vers ce sujet](#)

# Projets

- En Allemagne



Source: Federal Ministry of Economics and Technology, 2011

# Projets

- En Allemagne
  - Power plant in Landau, 3 MW



**Source: Federal Ministry of Economics and Technology, 2011**

# Projets

- En développement
  - Actuellement, seuls les sites à haute enthalpie sont en mesure de produire de l'électricité à un coût compétitif;
  - Le coût de forage est le principal frein à l'exploitation de la ressource géothermique (le diamètre des puits est relativement important (20 à 30 cm);  $\dot{m} = 25$  à 320 kg/s);
  - Précision limitée des techniques d'exploration géophysique et géochimique;
  - Taux de croissance annuel:  $\sim 8,5$  %.

# Projets

- Synthèse des défis
  - Résistance des pompes et autres équipements (chaleur, corrosion);
  - Technologies de forage;
  - Sismicité.
- Obstacles principaux
  - Disponibilité des ressources;
  - Compétition des autres formes de production d'énergie électrique renouvelable (solaire, PV, biomasse, hydro);
  - Coûts d'installation.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Différentes ressources géothermiques
- Coûts
- Projets
- ***Conclusion***

# Conclusion

- L'installation d'une centrale de géothermie haute température nécessite la présence de ressources géothermiques ainsi qu'un investissement initial important;
- Ces conditions limitent fortement son déploiement;
- Cependant, comme l'hydroélectricité, et contrairement au solaire et à l'éolien, elle reste une source d'électricité constante, fiable et décarbonée.



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions



# Références

- R Bertani, Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report geothermics, 41, 1-29.
- Godfrey Boyle Renewable Energy , Power for a sustainable Future. Oxford Press(2004)
- ESMAP , (2012), Guide Géothermique: planification et financement de la production d'énergie [https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP\\_Geothermal%20Handbook\\_FRENCH.pdf](https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP_Geothermal%20Handbook_FRENCH.pdf)
- Lamarche, Zinsalo, (2017), Produire de l'électricité par géothermie profonde <http://substance.etsmtl.ca/produire-de-lelectricite-par-geothermie-profonde>

La première et la plus importante étape pour concevoir une centrale géothermique est l'évaluation précise du potentiel géothermique, ainsi que de la prédiction de la réponse du réservoir à des configurations d'exploitation industrielle données (Franco et Vaccaro, 2014).

# Références

- Vulgarisation

- Géothermie les différents types et leur maturité, un MOOC de l'U. Perpignan

- <https://www.youtube.com/watch?v=67JOCAWG9rs>

- Fonctionnement d'une centrale géothermique à haute énergie – production électrique

- <https://www.youtube.com/watch?v=ABp9A-ozIV4>