



(Comeau et al., 2019)

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE ET LES MINES

Plan de la presentation



Les ressources géothermiques de très basse température

Les familles de pompes à chaleur géothermique

L'énergie géothermique sur les sites miniers

Les projets de l'équipe sur les mines actives

Les projets de l'équipe sur les mines fermées

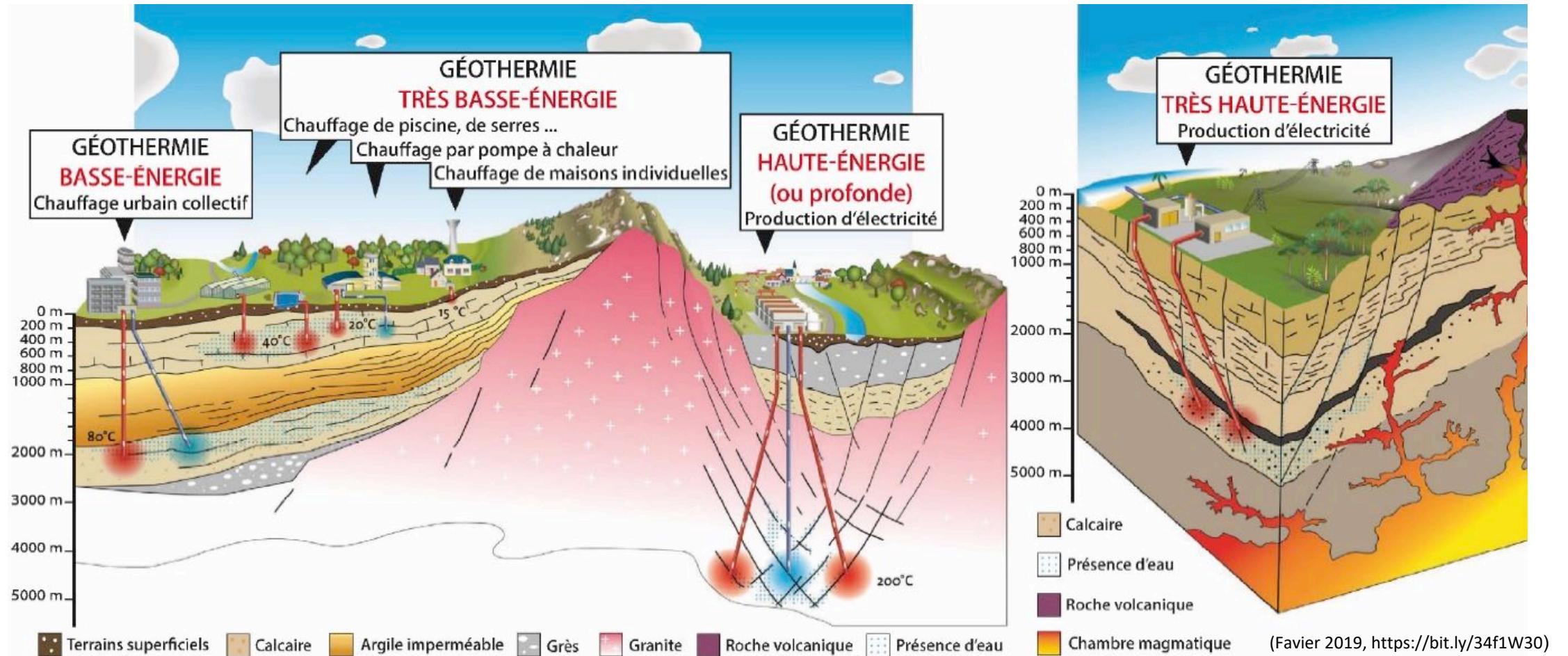
Projet à venir

Mots de la fin



Les ressources géothermiques de très basse température

Qu'est ce que c'est ?



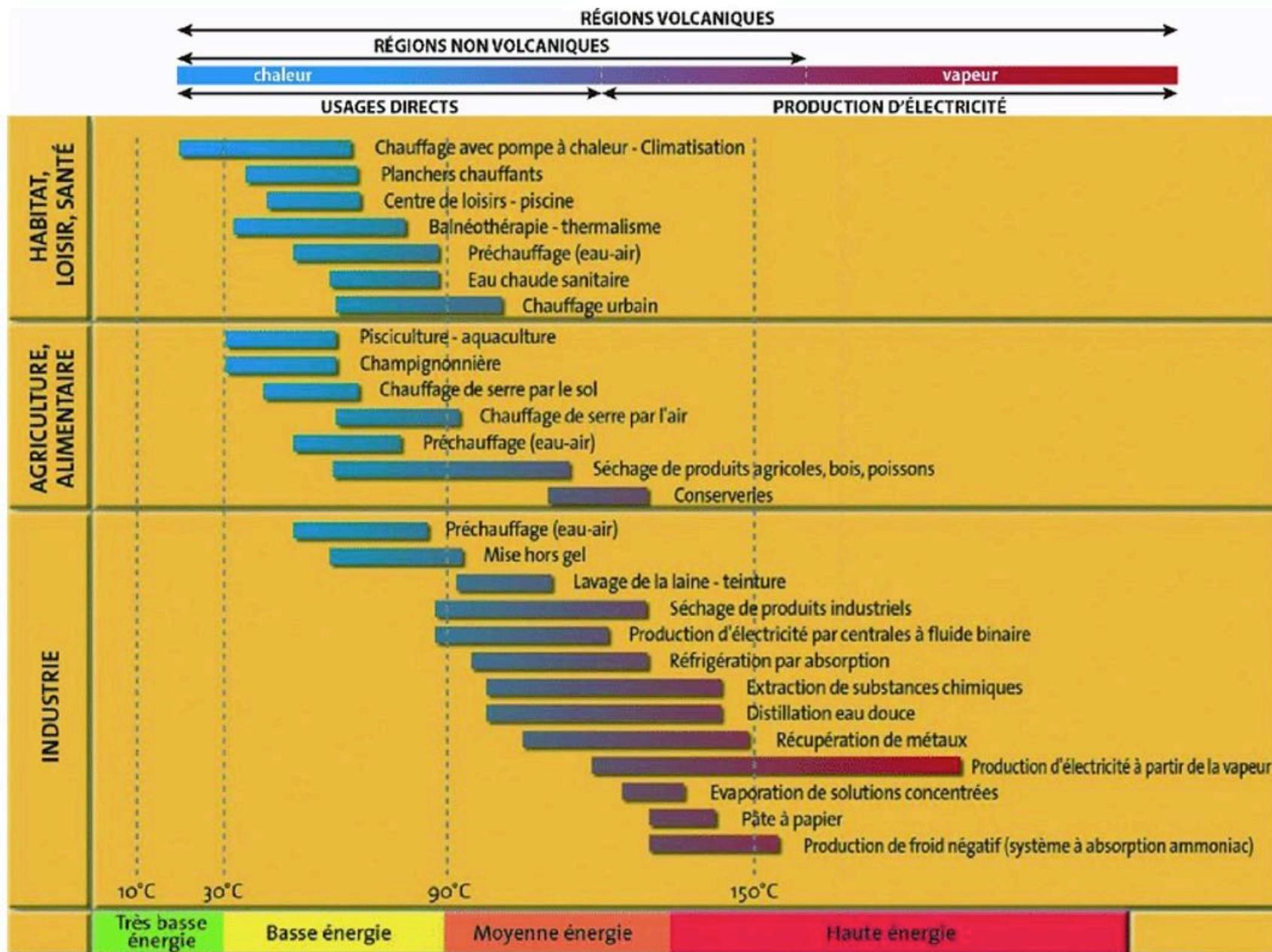
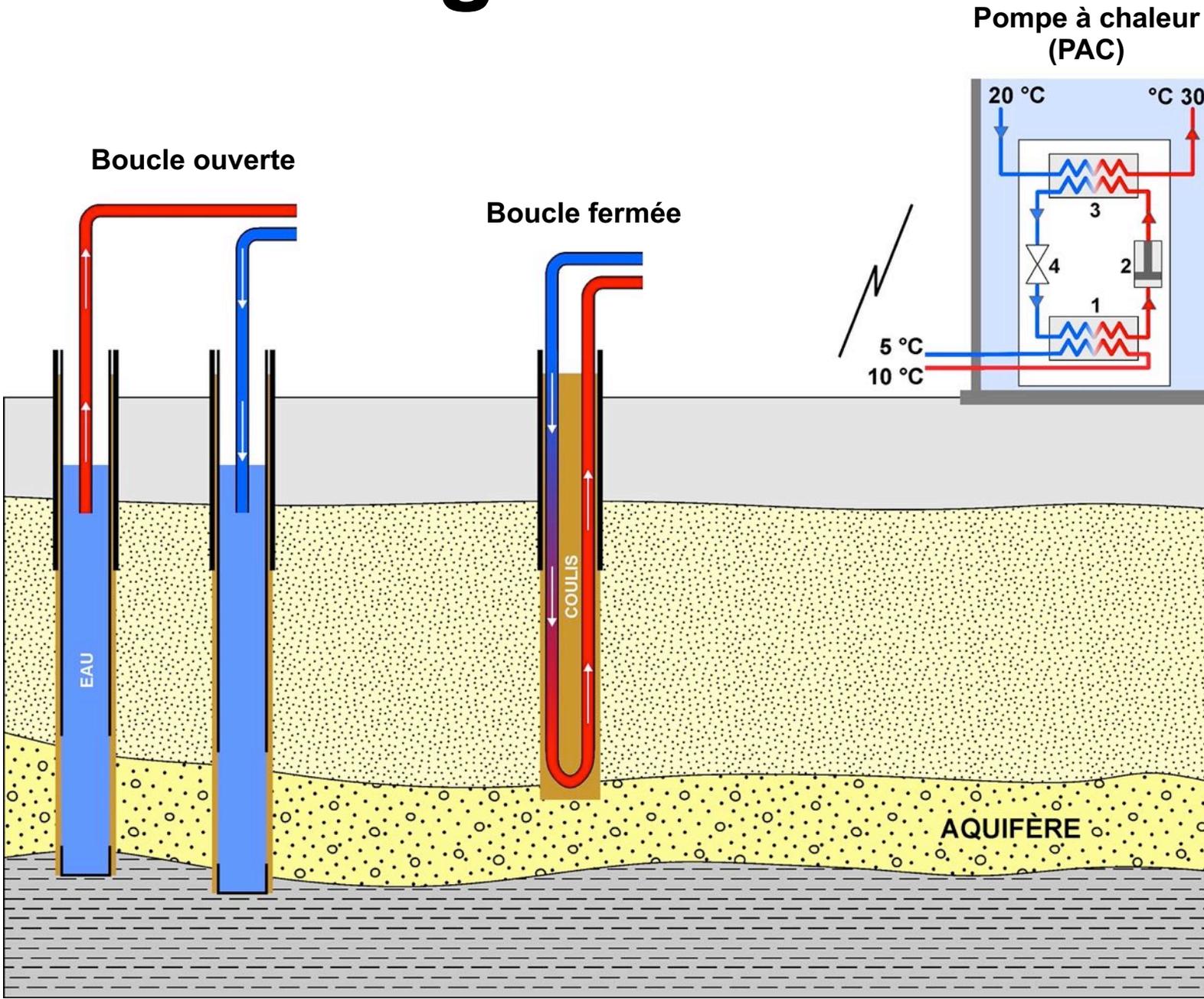


Diagramme de Lindal

- Les possibilités d'utilisation sont limitées par la **température disponible**
- **Usages directs** de la chaleur géothermique
- Chauffage et climatisation nécessitent une **pompe à chaleur (PAC)** géothermique

(Favier 2019, <https://bit.ly/34f1W30>)

Les configurations



- **Boucle ouverte**

Extraction et injection de l'eau souterraine

- **Boucle fermée**

Circulation d'un fluide caloporteur

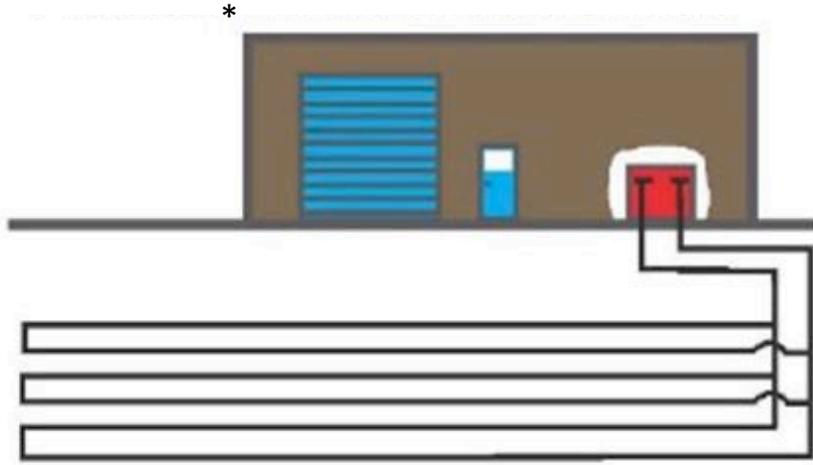
- **Pompe à chaleur (PAC)**

- 1) Évaporation du réfrigérant
- 2) Le compresseur amplifie la pression
- 3) Le réfrigérant transfère son énergie
- 4) Condensation du réfrigérant

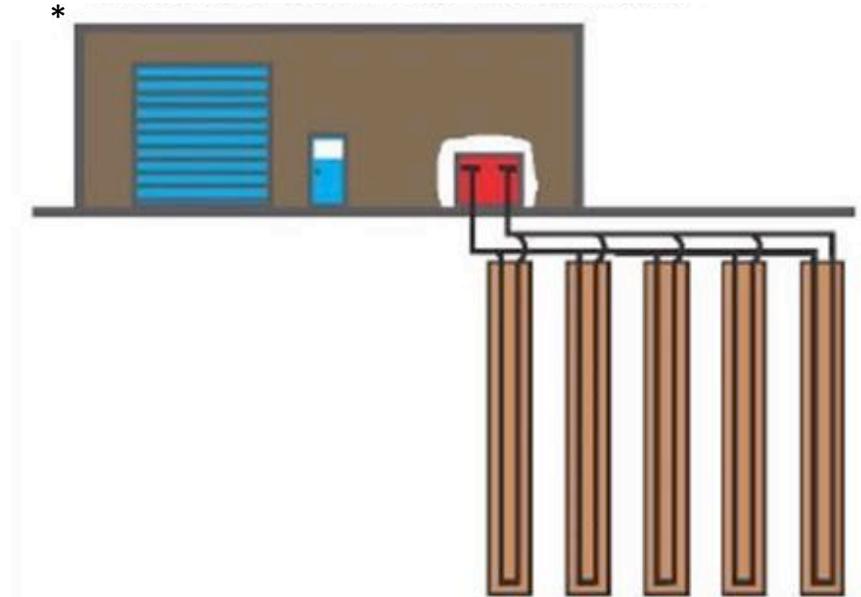


Les familles de pompes à chaleur géothermique

PAC couplée au sol



Boucle fermée horizontale

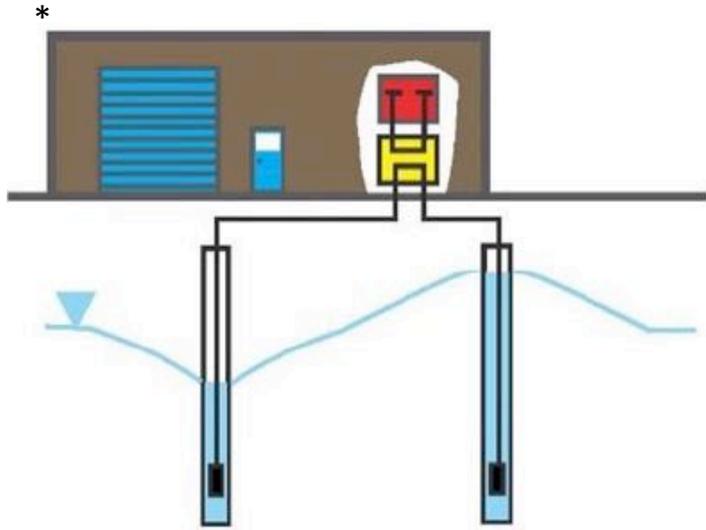


Boucle fermée verticale

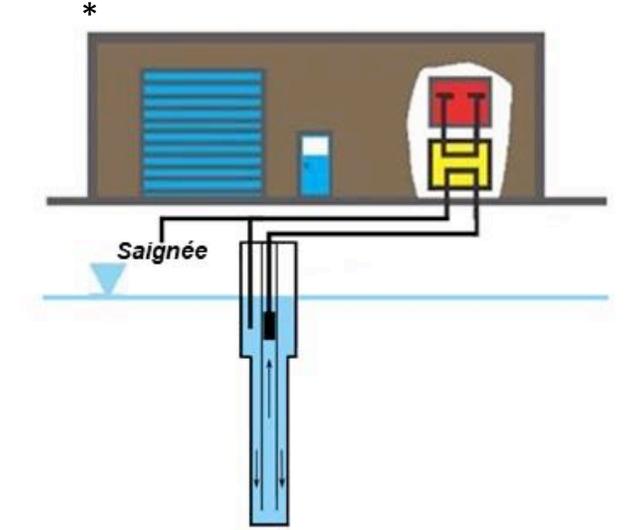
*(Comeau et al., 2018)

- Uniquement à boucle fermée
- Bénéficie de l'inertie thermique du sous-sol
- Peut être installée dans tout environnement géologique

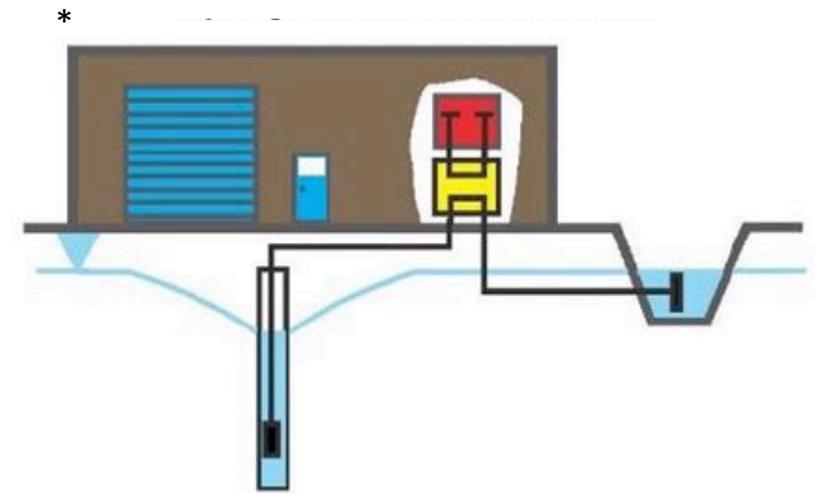
PAC d'aquifère



Doublet géothermique



Puits à colonne permanente

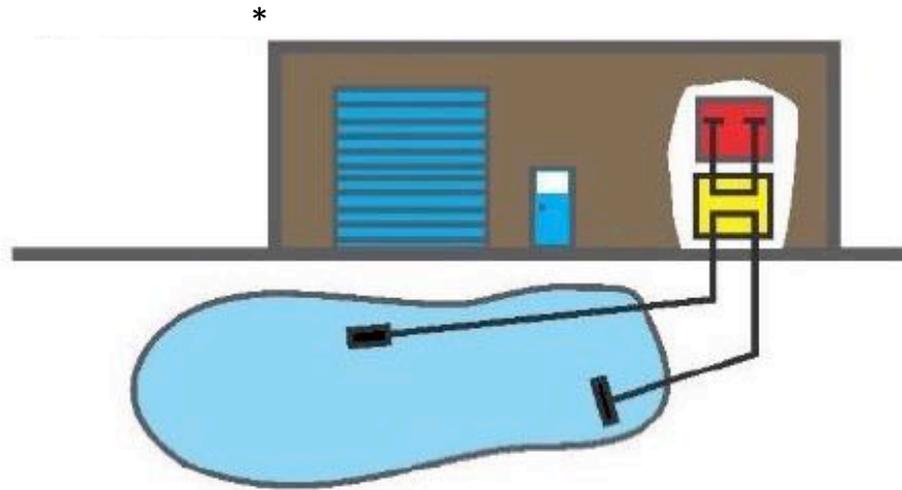


Injection en surface

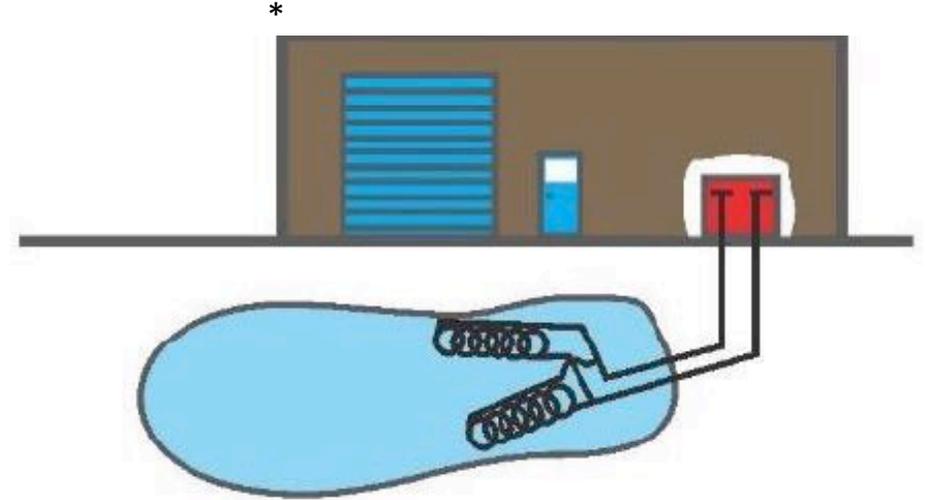
*(Comeau et al., 2018)

- Uniquement à boucle ouverte
- Bénéficie de l'inertie thermique de l'eau souterraine
- Nécessite des conditions géologiques favorables

PAC d'eau de surface



Boucle ouverte



Boucle fermée

*(Comeau et al., 2018)

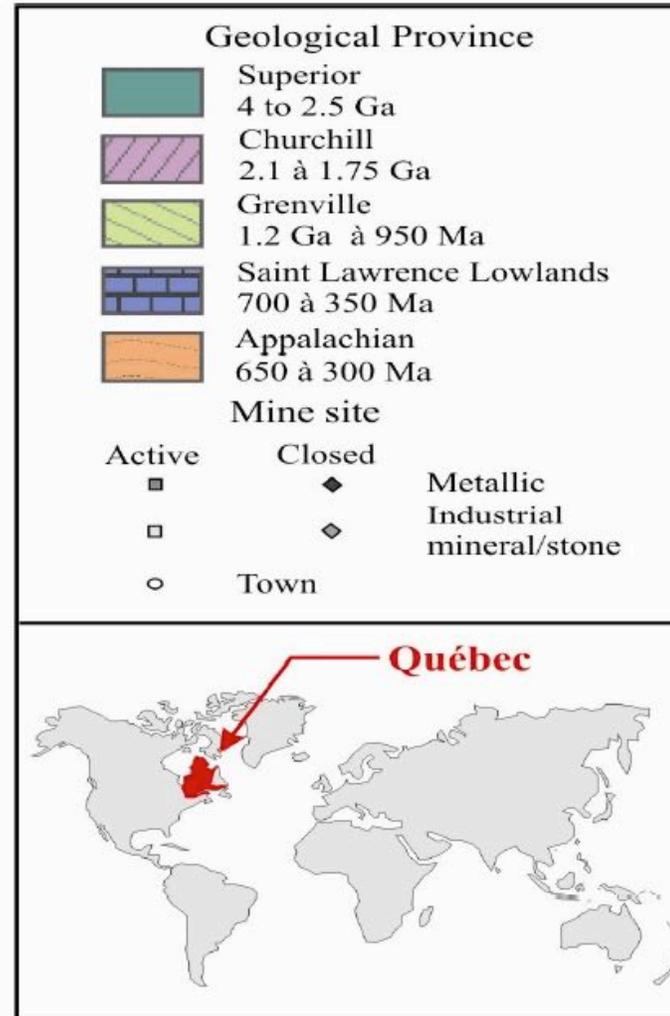
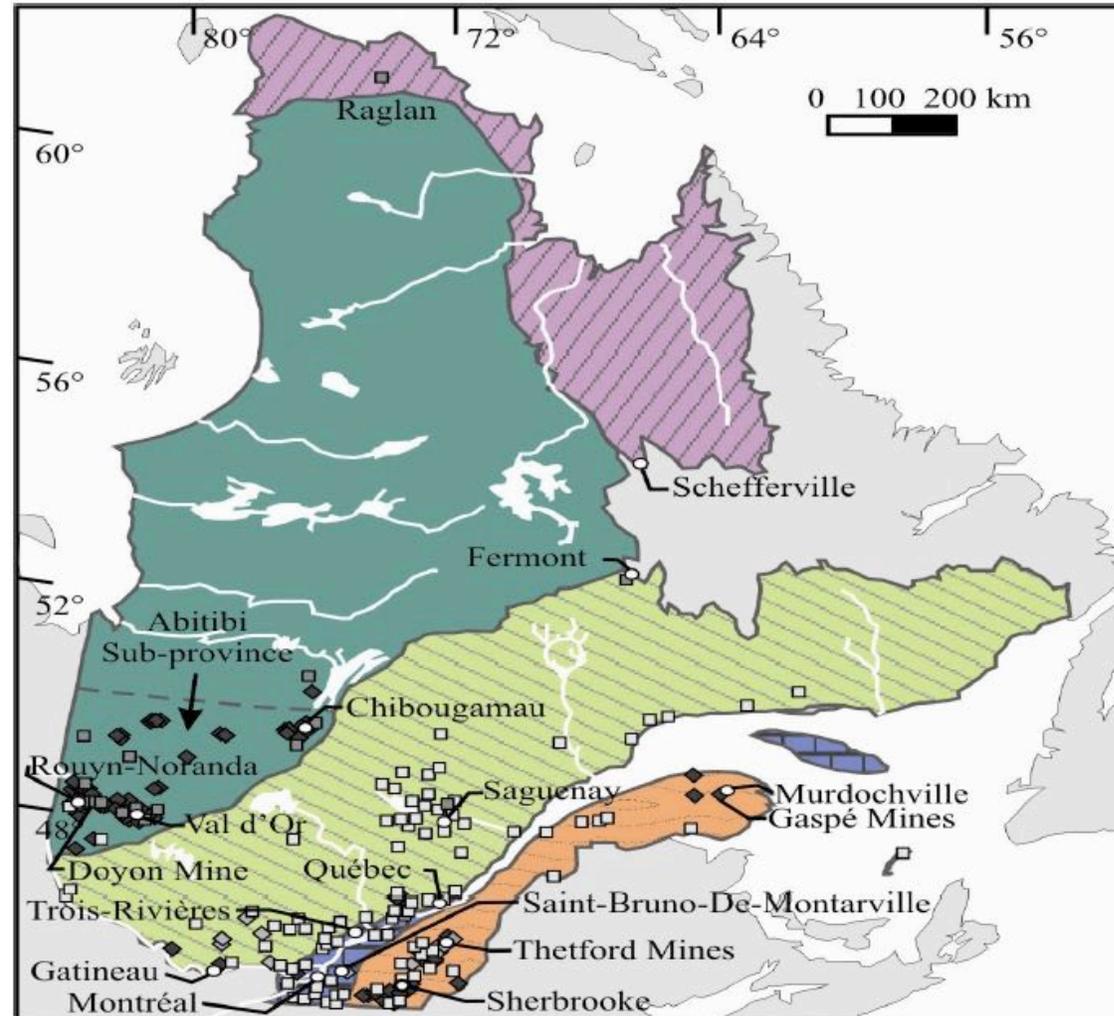
- Peut être à boucle ouverte ou fermée
- Bénéficie de l'inertie thermique des plans d'eau



L'énergie géothermique sur les sites miniers

Intérêt des sites miniers au Québec

(Raymond et al., 2008)



Grande concentration au Sud de la province

- Utilisateurs potentiels plus à proximité de la source

Peuvent faciliter l'installation des systèmes géothermiques

- Moins de restrictions environnementales
- Avantages associés aux coûts d'installation

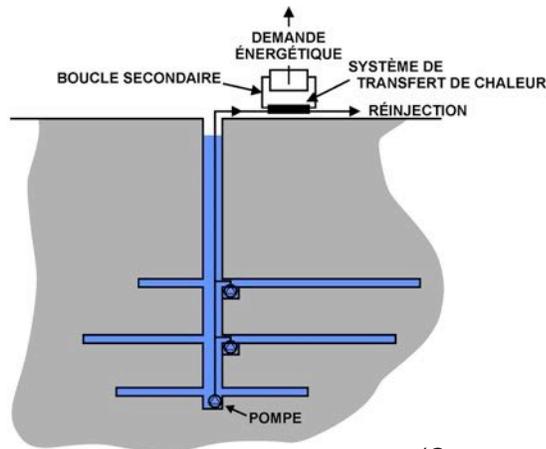
Trois possibilités :

- Chauffage
- *Free-cooling*
- Climatisation

Les sources potentielles

Aquifères

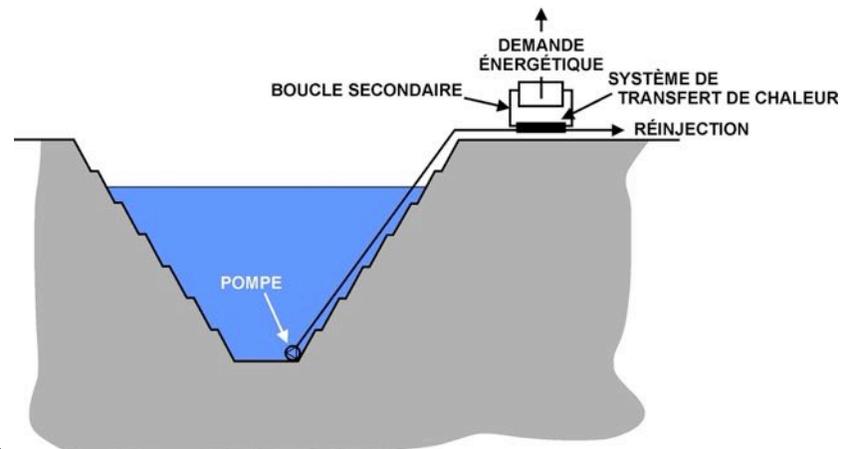
- Eau de dénoyage
- Galeries inondées



(Comeau et al., 2019)

Plan d'eau de surface

- Bassins de rétention d'eau
- Fosses inondées



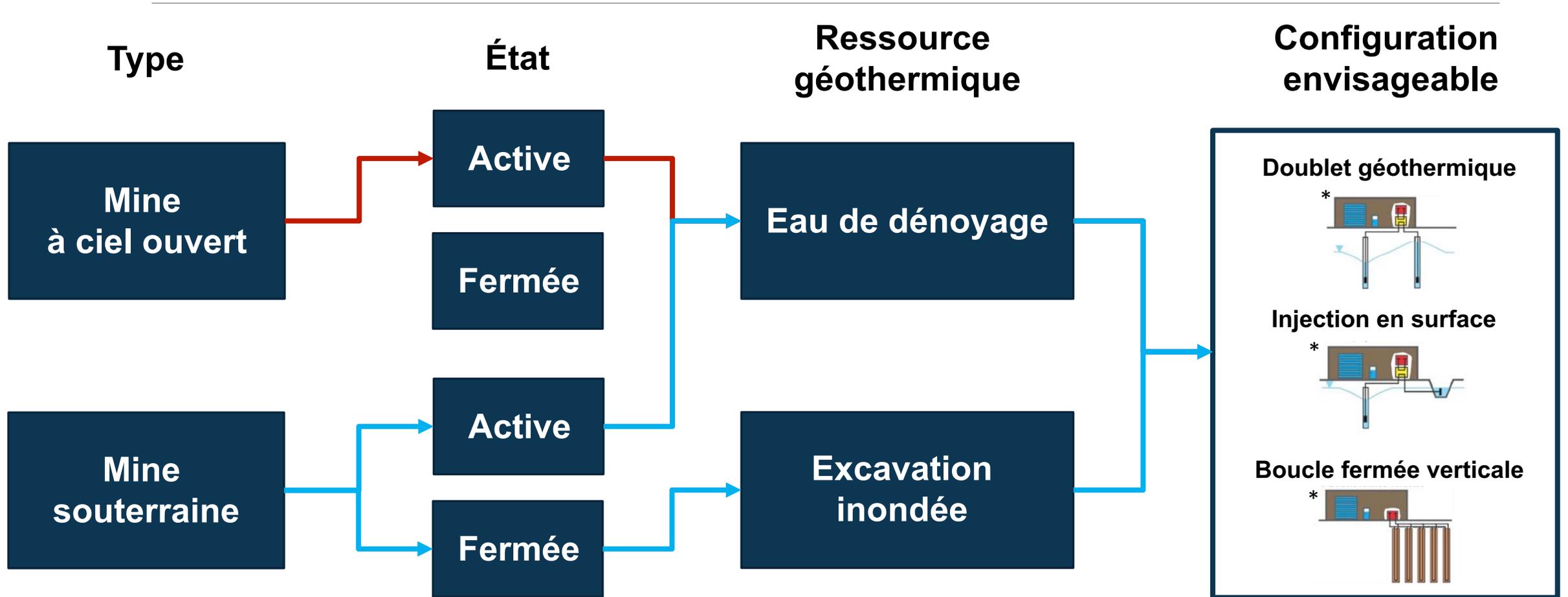
Résidus miniers

- Halde à stériles
- Parc à résidus

La province du Québec comprend plus de :

- 51 mines et 2300 carrières actives
- 752 mines et 639 carrières fermées
- 146 bassins de rétention d'eau
- 555 parcs à résidus miniers

Aquifère



*(Comeau et al., 2018)

Mine de charbon Springhill

Localisation : Nouvelle-Écosse, Canada

Type : Mine souterraine

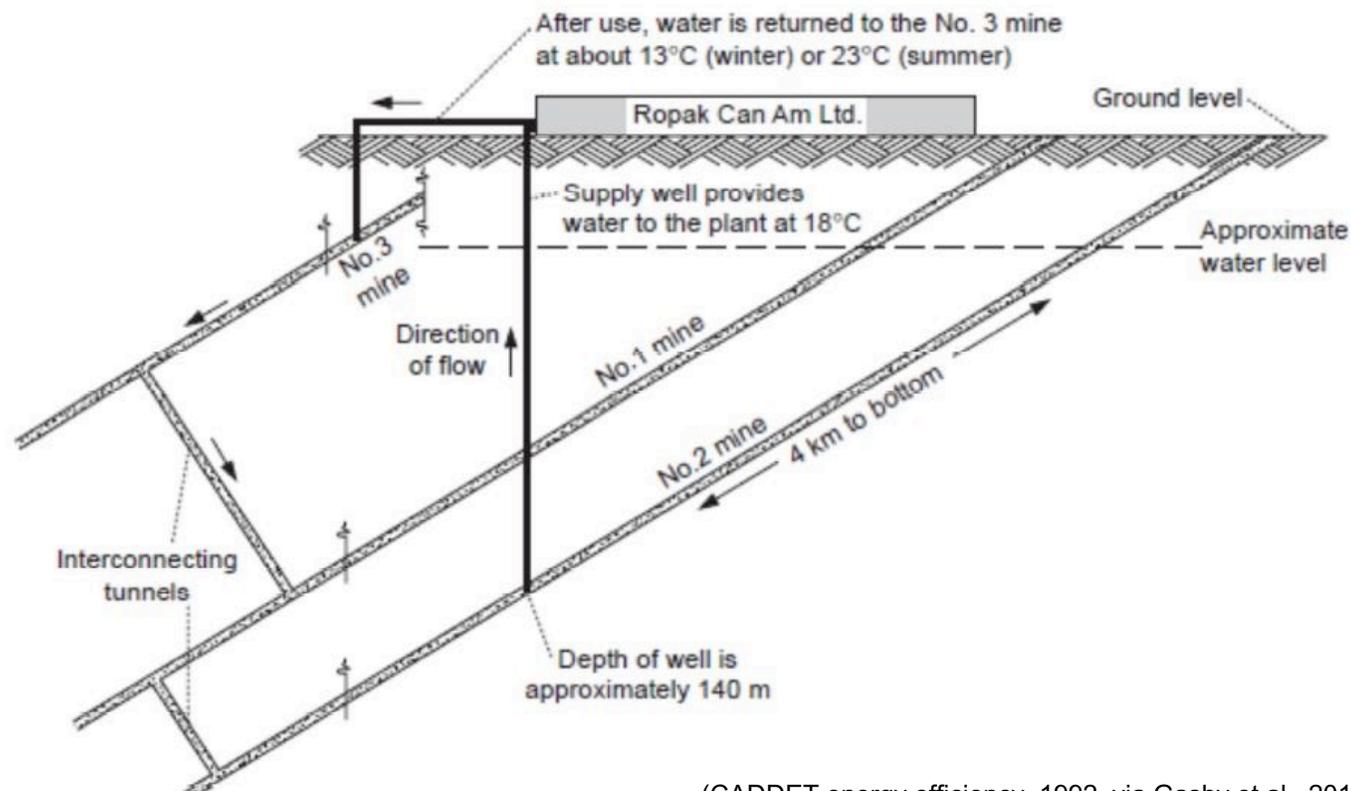
État : Fermée depuis 1958

Ressource géothermique :

- Volume d'eau dans les galeries ($4 \times 10^6 \text{ m}^3$)
- Ressource estimée à 250 TJ
- Extraction à 18 °C et réinjection à 13-23 °C

Utilisation : Chauffage et climatisation de l'industrie Can-Am (superficie de 13 500 m²) depuis 1989

Économie : 600 MWh d'énergie nette, soit 45 000\$ pour la première année d'exploitation



(CADET energy efficiency, 1992, via Gasby et al., 2012)

Mine de charbon Oranje Nassau (Mine Water 2.0)

Localisation : Heerlen, Pays-Bas

Type : Mine souterraine

État : Fermée entre 1965 et 1974

Ressource géothermique :

Capacité d'extraction maximale

- 120 m³/h d'eau chaude (28 °C)
- 230 m³/h d'eau froide (16 °C)

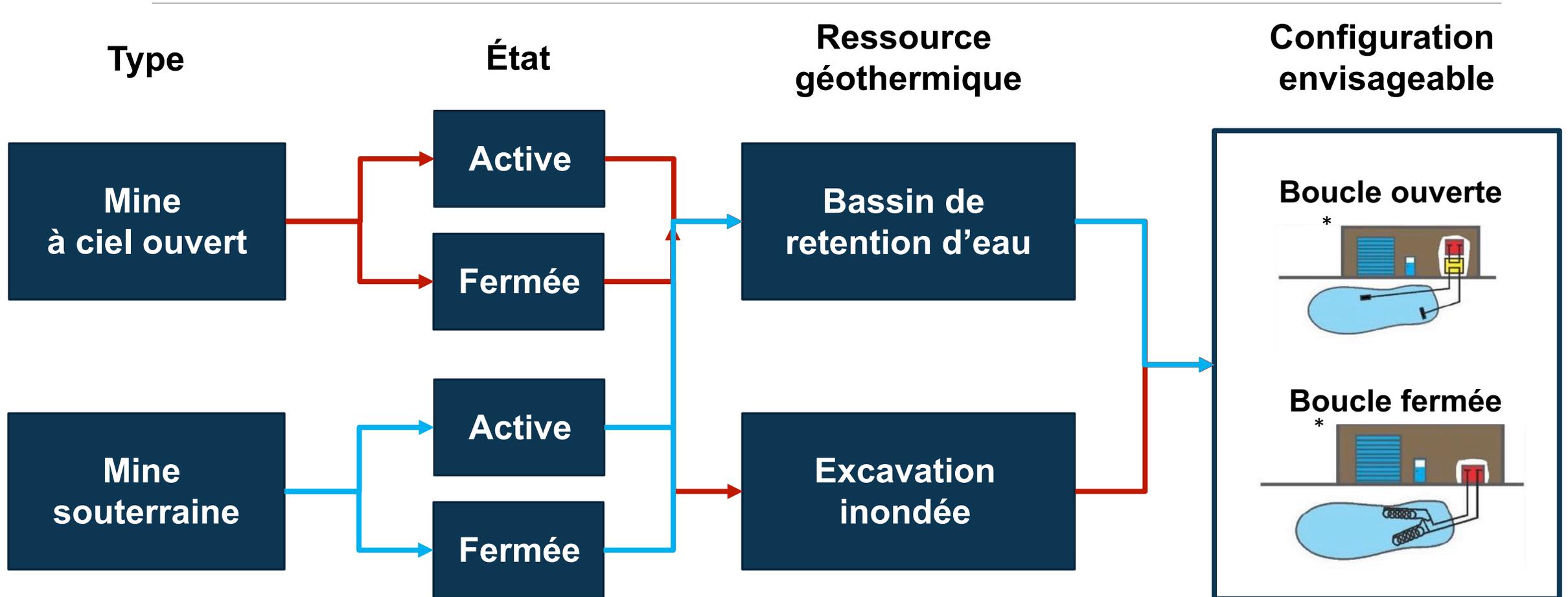
Utilisation : Chauffage et climatisation d'habitations, d'édifices à bureau, d'établissements scolaires, de supermarchés et d'une installation sportive (superficie de 500 000 m² en 2015)

Économie : Réduction de prix de 10% aux utilisateurs comparativement aux solutions conventionnelles



(Verhoeven et al., 2014)

Plan d'eau de surface



Carrière Goyer

Localisation : Saint-Bruno de Montarville, Canada

Type : Carrière (Fosse à ciel ouvert)

État : Fermée depuis 1993

Ressource géothermique :

- Volume d'eau 8 064 000 m³
- Extraction de l'eau à 4 °C

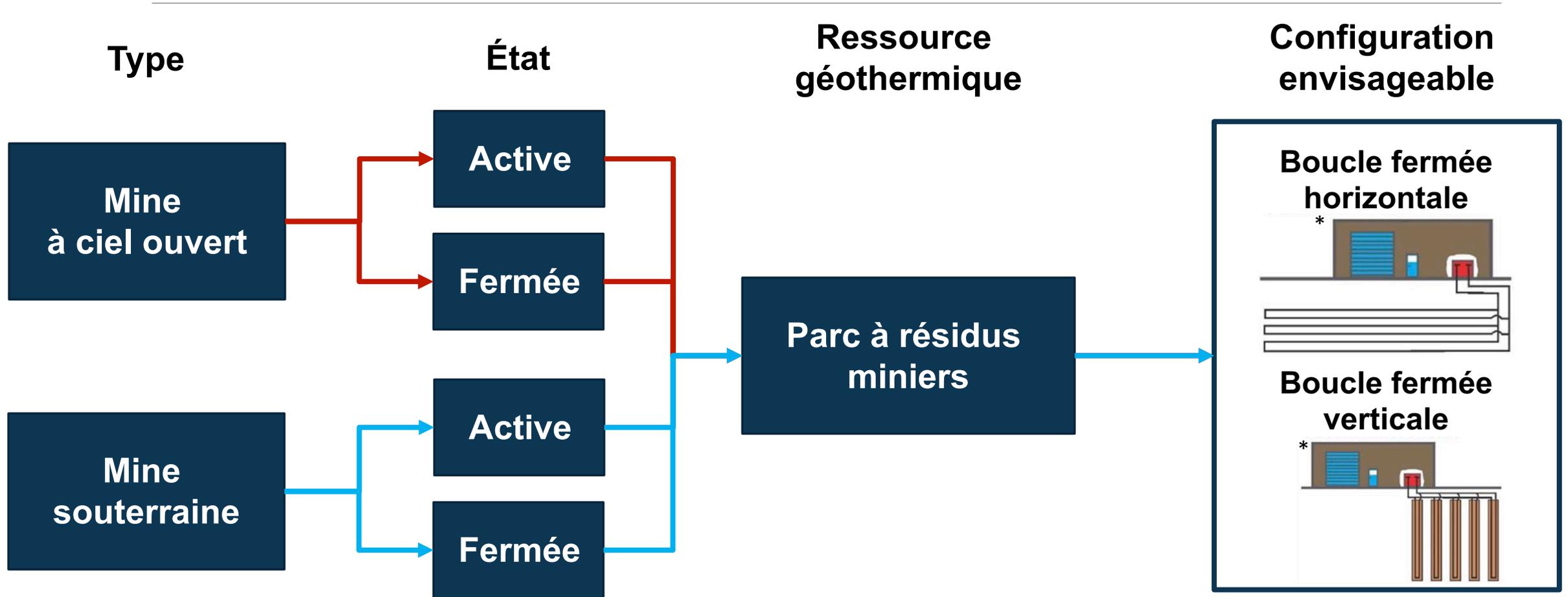
Utilisation : Chauffage et climatisation d'un complexe de six édifices à condos (superficie de 6 039 m² chacun) depuis 2006

Économie : Procure une économie d'énergie aux utilisateurs entre 40 et 50%



(Découverte Patrimoine et Culture, 2022, <https://bit.ly/3uePuuH>)

Résidus miniers



*(Comeau et al., 2018)

Autres exemples

Pays	Localisation	Fins d'utilisation	Type d'installation	Volume (million m ³)	Température (°C)	Aire desservie (m ²)	Capacité énergétique (kW)
Allemagne	Freiberg	Château et musée minéralogique	Boucle ouverte et fermée	495	10.2	---	130
Norvège	Folldal	Musée minier	Boucle fermée	---	6	1 599	18
Italie	Asturias	Centre de recherche, résidences pour étudiants et hôpital	Boucle ouverte et fermée	6	17 - 23	57 393	1000 - 3 6000
Royaume-Unis	Shettleston	Batiments résidentiels	Boucle ouverte	---	12	28 000	---
États-Unis	Park Hills	Batiments municipaux	Boucle ouverte et fermée	265	13.9	753	113

(modifié de Comeau et al., 2020)



Projets de l'équipe sur les mines actives

Mine Éléonore



Baie-James, Québec



Edgardo Jose Alvarado
(mémoire de maîtrise)



Projet terminé en **2020**



Évaluer le potentiel géothermique d'une mine en exploitation dans un environnement nordique

Dresser un portrait techno-économique des systèmes de PAC géothermique comme solution de chauffage au site



(The Northern Miner, 2019, <https://bit.ly/3Ggv4U8>)

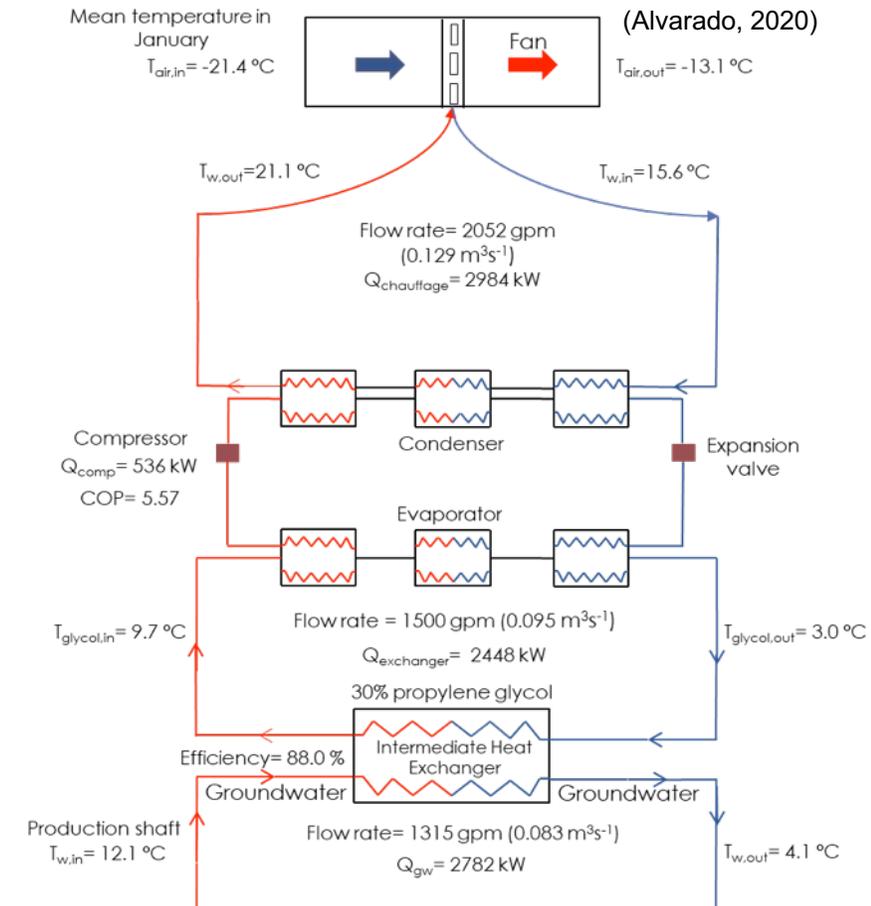
Mine Éléonore



- Conception d'une PAC géothermique adaptée au système de dénoyage de la mine
- Développement d'un modèle numérique hydrogéologique



- Permettrait de produire entre **39 – 45 % de l'énergie nécessaire** pour chauffer les galeries souterraines
- Contribue à la **réduction de gaz à effet de serre** d'environ 1993 tonnes/année



Mine Con



Yellowknife, Territoires du Nord-Ouest



Dan David Ngoyo Mandemvo
(mémoire de maîtrise)



Projet en **finalisation**



Améliorer l'approche analytique servant à déterminer le potentiel géothermique contenue dans une mine souterraine inondée (fermée).



(Photo prise par Dan David Ngoyo Mandemvo)

Mine Con

- Travaux de terrain et de laboratoire
 - Échantillonnage de roche
 - Propriétés hydrauliques et thermiques
 - Profils de température
- Estimation de la ressource par **approche analytique**
- Simulation des phénomènes d'écoulement couplés aux phénomènes de transfert de chaleur par **modèle numérique**
- Finalisation du projet





Projets de l'équipe sur les mines fermées

Mine Gaspé



Murdochville, Québec



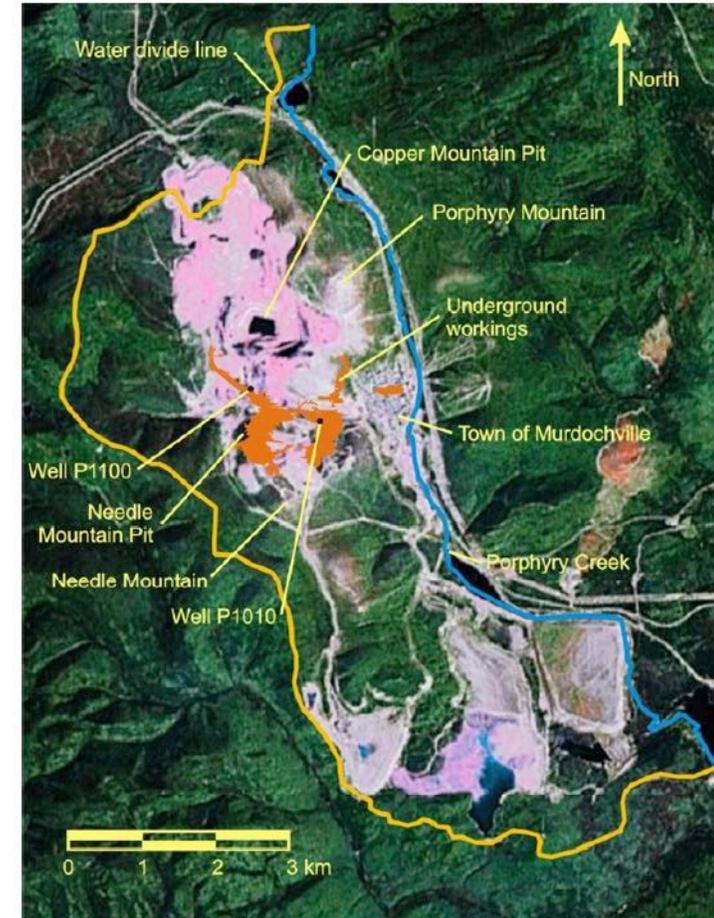
Jasmin Raymond
(these de doctorat)



Projet terminé en **2010**



Développer, calibrer et appliquer un modèle numérique pour optimiser un système de pompe à chaleur sur eau souterraine aux mines de Gaspé.



(Raymond, 2010)

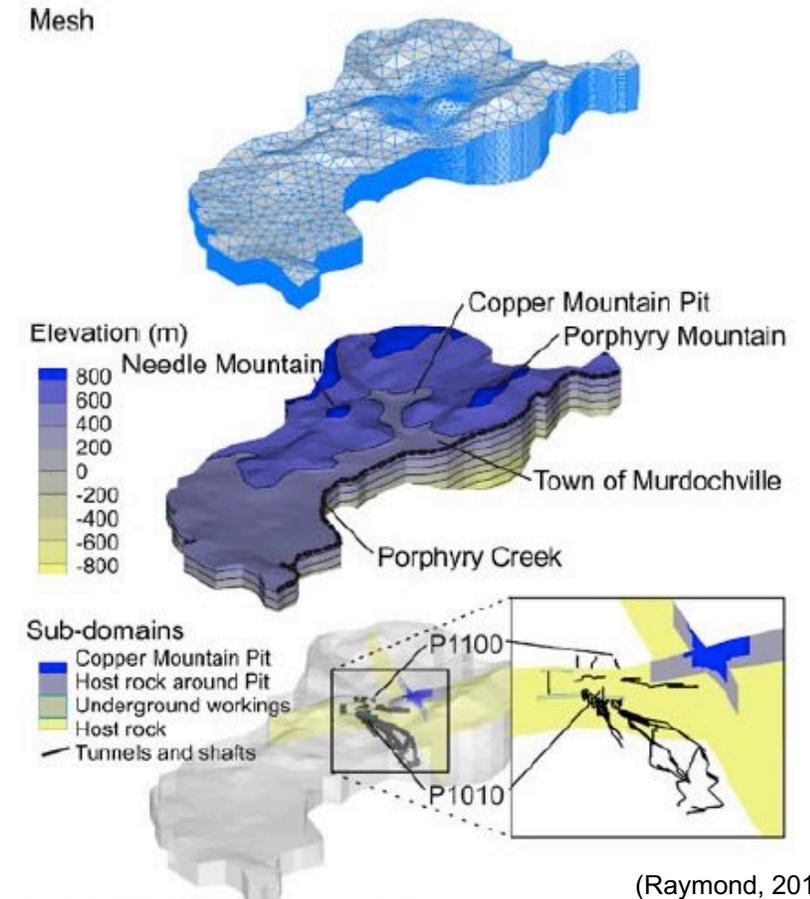
Mine Gaspé



- Calibration des propriétés hydrauliques et thermiques des matériaux à l'aide d'**observation de terrain**
- **Étude de sensibilité** des paramètres
- Déterminer le meilleur débit d'exploitation selon les prédictions des **modèles numériques**



- Taux de pompage optimal de **0,049 m³/s** (2 940 L/min) pour 50 ans
- Peut permettre jusqu'à **2 500 kWh** d'économies annuelles, soit **175 000 \$/h**
- Suppose une température de retour de **3 °C**



(Raymond, 2010)

Mine Doyon



Abitibi, Québec



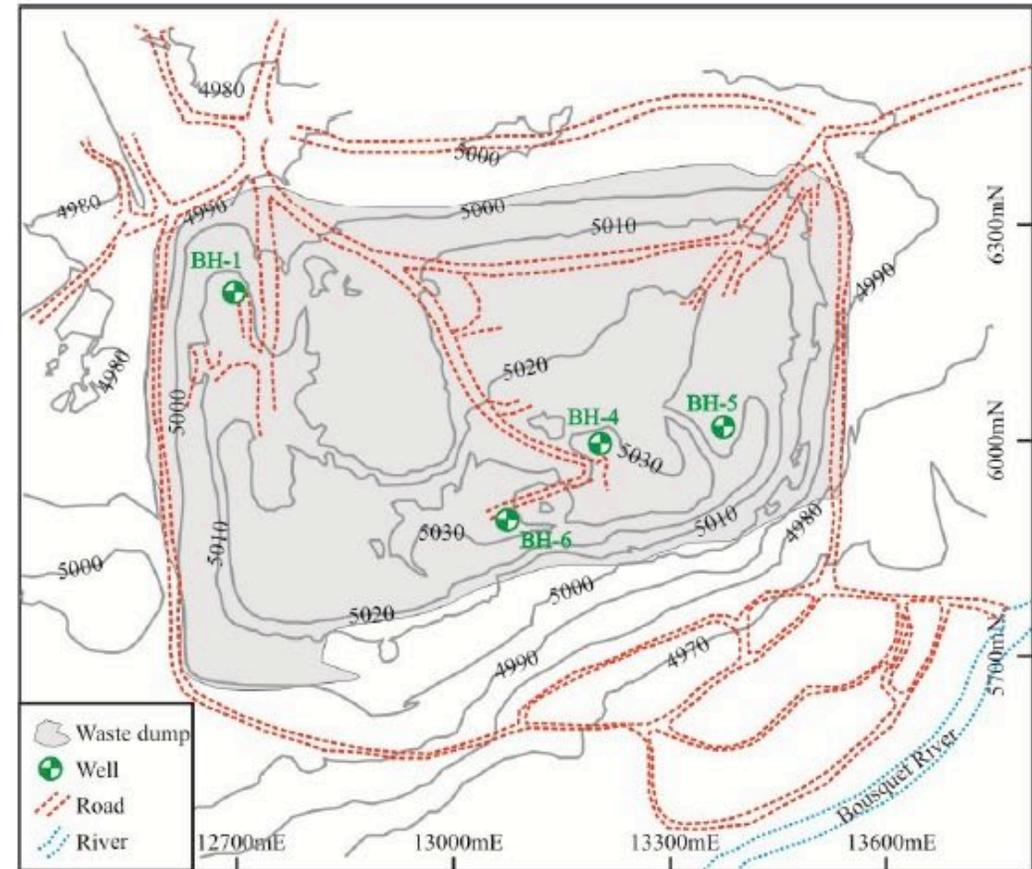
Jasmin Raymond
(these de doctorat)



Projet terminé en **2010**



Déterminer comment et dans quelle mesure les systèmes de pompes à chaleur couplés au sol peuvent bénéficier de l'augmentation des températures souterraines due à la chaleur produite des résidus miniers



(Raymond, 2010)

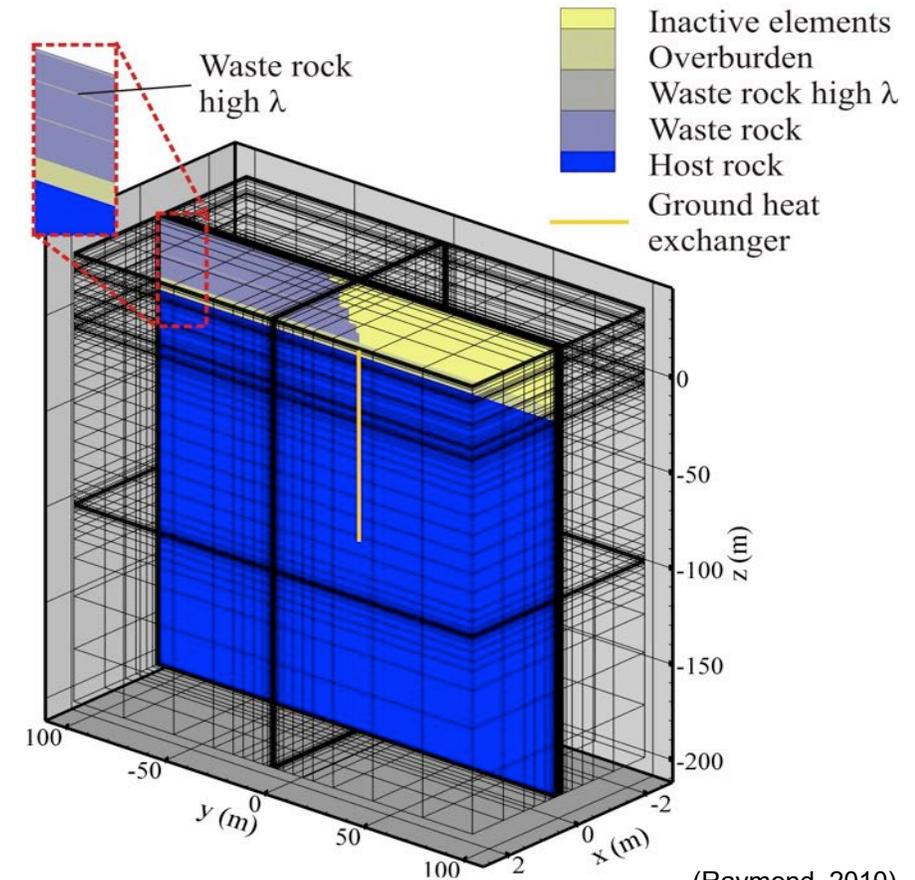
Mine Doyon



- **Caractérisation des stériles** avec essai de réponse thermique conventionnel
- **Caractérisation du mort terrain et du roc** par essai de réponse thermique avec câble chauffant
- **Simulations numériques** pour reproduire la distribution de température



- Permet de **fournir plus d'énergie thermique** qu'un échangeur situé dans un environnement conventionnel
- **Réduit la longueur de forage** à l'installation d'environ 30%



(Raymond, 2010)

Mine King-Beaver



Thetford Mines, Québec



Dan David Ngoyo Mandemvo & Félix-Antoine Comeau
(essai et rapport de recherche)



Projet terminé en **2018**



Évaluer le potentiel géothermique des mines de Société Asbestos limitée



(Comeau et al., 2019)

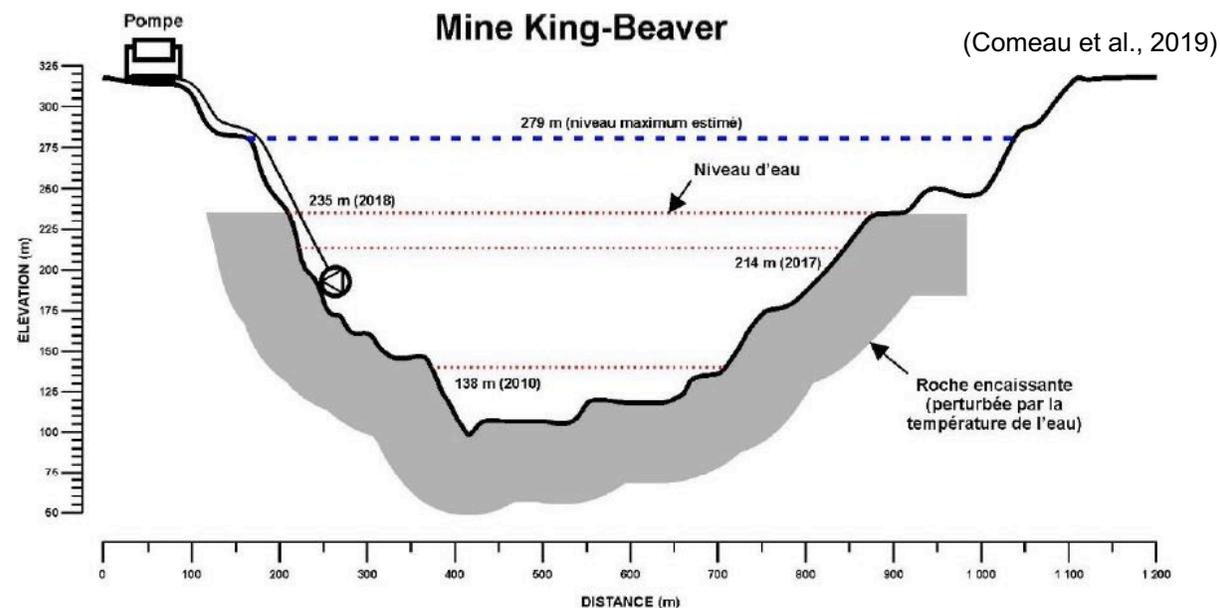
Mine King-Beaver



- Estimation de la ressource par un bilan thermique simple
- Simulations numériques considérant les phénomènes physiques naturels



- 1.37 MW de puissance thermique disponible pour le **chauffage** durant 25 ans
- 2 MW de puissance thermique disponible pour le **free-cooling** durant 25 ans
- 5.46 MW de puissance thermique disponible pour la **climatisation** durant 25 ans



Carrière Provana



Turin, Italie



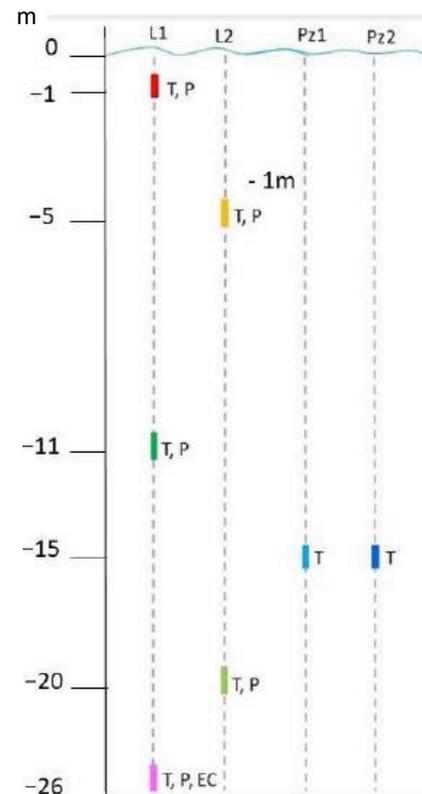
Félix-Antoine Comeau, Nicolo Giordano
& Jasmin Raymond
(article de recherche)



Projet terminé en **2020**



Étudier si les carrières inondées sont des sites potentiels pour répondre au besoin de chauffage et en climatisation des locaux situés à proximité



(Chicco et al., 2021)

Carrière Provana



- **Distribution spatiale et tendance temporelle** de la température de l'eau
- Estimation de la ressource par **un bilan thermique simple**
- Permettrait de fournir la chaleur nécessaire à une serre de **32 345 m² de superficie**
- Système géothermique permettrait **une réduction de gaz à effet de serre** de 2.9 tonnes/année (pour période de 6 mois)

m	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	AVERAGE	
													YEAR	NOV to APR
air	2.6	6.3	8.9	13.8	16.6	22.6	23.8	23.6	19.3	13.9	6.7	2.3	13.4	6.8
Pz1	13.9	12.4	11.9	12.0	12.7	13.3	14.4	15.2	16.1	16.3	15.9	15.0	14.1	13.5
Pz2	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.5	13.6	13.6	13.6
0-5	8.9	8.2	10.8	14.3	18.3	22.0	25.4	26.4	23.4	21.5	15.7	11.0	17.2	11.5
5-10	8.7	7.7	8.6	10.9	13.9	16.5	18.8	20.9	19.4	19.2	15.3	11.0	14.3	10.4
10-15	8.9	7.9	8.4	9.6	10.9	12.2	13.4	14.8	14.9	15.0	14.1	11.3	11.8	10.0
15-20	8.9	7.8	8.2	9.1	10.1	11.0	12.1	12.9	13.4	13.9	13.8	11.2	11.0	9.8
20-25	9.4	8.9	9.5	9.9	10.7	11.1	11.6	11.8	12.1	12.9	12.9	11.1	11.0	10.3
25-30	10.2	10.5	11.4	11.4	11.9	11.6	11.3	11.0	11.0	11.8	11.9	11.1	11.3	11.1

(Chicco et al., 2021)



Projet à venir

Mines King-Beaver & Carey Canadian



Thetford Mines & Tring-Jonction, Québec



Samuel Lacombe
(mémoire de maîtrise)



Projet débuté en **2021**



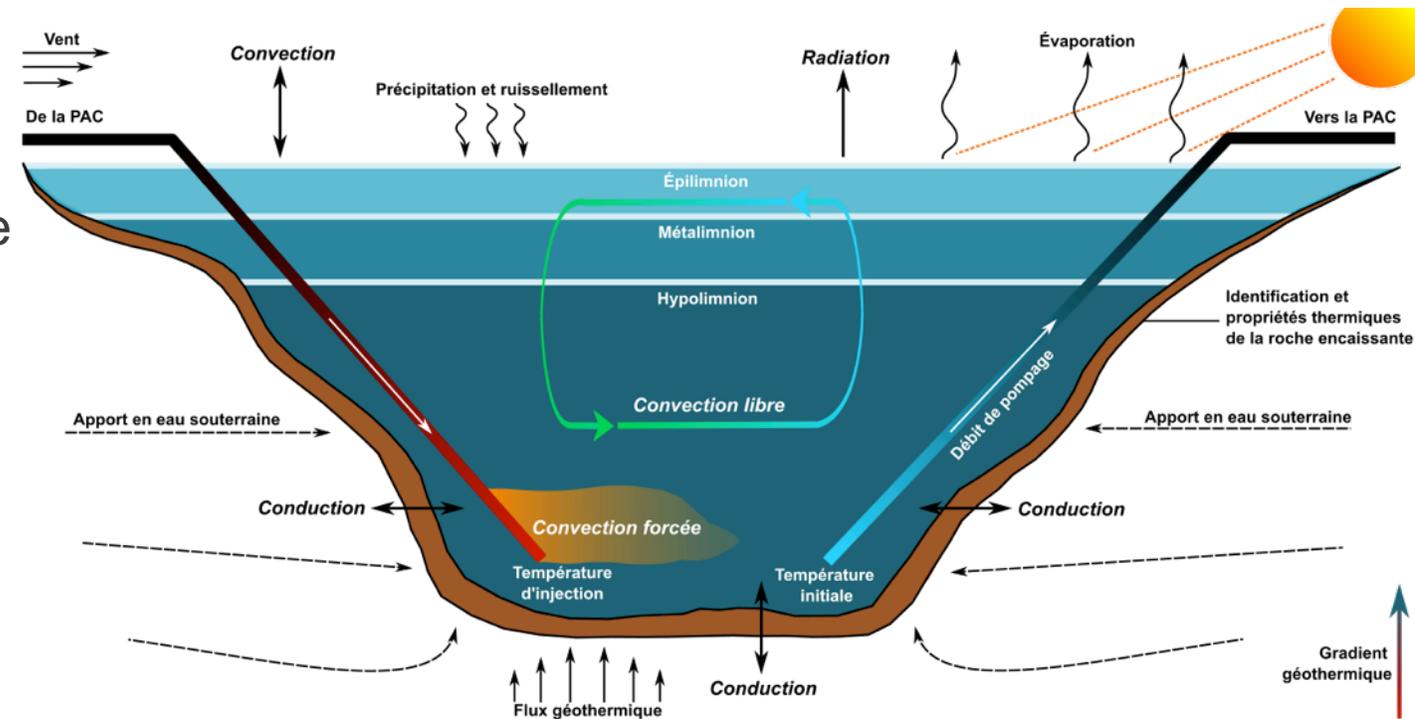
Évaluer et diminuer le potentiel de court-circuitage thermique lors de l'opération d'un système géothermique installé dans des mines à ciel ouvert inondées (fermées).



(Photo prise par Félix-Antoine Comeau)

Mines King-Beaver & Carey Canadian

- Estimation de la ressource par **approche analytique**
- **Simulations numériques** considérant les phénomènes physiques naturels et le fonctionnement d'un système géothermique
- Travaux de terrain
 - Profil de température annuel de l'eau des fosses
 - Échantillonnage
 - Réseau de fractures et **conductivité hydraulique**
- Travaux de laboratoire
 - **Propriétés thermiques** des lithologies





Mots de la fin



Pourquoi la géothermie ?

(Photo prise par Félix-Antoine Comeau)

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre
- Procure des retombées économiques aux utilisateurs
- Énergie renouvelable et environnementalement propre
- Potentiel d'exploitation dans tout type d'environnement



(Photo prise par Félix-Antoine Comeau)

Pourquoi sur des sites miniers ?

- Procure des économies d'énergie aux mines actives
- Réduit considérablement le coût de l'installation des systèmes géothermiques
- Projette un meilleur réaménagement et une restauration efficace des sites
- Contribue à la réduction de leurs empreintes environnementales



(Photo prise par Félix-Antoine Comeau)

Merci pour votre écoute

Références bibliographiques

- Alvarado, E. J., 2020. Geothermal energy potential of active mines in northern regions: the Éléonore mine case-study, Mémoire de maîtrise, Québec, Institut nationale de la recherche scientifique
- Banks, D., P. L. Younger, R.-T. Arnesen, E. R. Iversen, and S. B. Banks, 1997, Mine-Water Chemistry: The Good, the Bad and the Ugly, *Environmental Geology* 32 (3): 157–74, <https://doi.org/10.1007/s002540050204>
- Chicco, J. M., F.-A. Comeau, A. Casasso, C. Comina, N. Giordano, G. Mandrone, and J. Raymond, 2021, Alternative Use of Artificial Quarry Lakes as a Source of Thermal Energy for Greenhouses, *Water* 13 (24): 3560, <https://doi.org/10.3390/w13243560>
- Chu, Z., K. Dong, P. Gao, Y. Wang, and Q. Sun. 2021, Mine-Oriented Low-Enthalpy Geothermal Exploitation: A Review from Spatio-Temporal Perspective, *Energy Conversion and Management* 237, 114123, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114123>
- Comeau, F.-A., J. Raymond, and D. D. Ngoyo Mandemvo, 2019, Évaluation du potentiel géothermique des mines désaffectées de Société Asbestos limitée à Thetford Mines, Rapport de recherche, Québec, Institut national de la recherche scientifique
- Comeau, F.-A., and J. Raymond, 2018, Revue de la littérature sur les règlements et les normes relatifs aux systèmes de pompes à chaleur géothermique face à la protection des prélèvements d'eau, Québec, Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement, <https://bit.ly/3lEXel>
- Comeau, F.-A., S. Séjourné, and J. Raymond, 2020, Assessment of Geothermal Resources in Onshore Nova Scotia - Setting the Stage, Demonstrating Value, and Identifying Next Steps, Rapport de recherche, Québec, Institut national de la recherche scientifique
- Grasby, S. E., D. M. Allen, S. Bell, Z. Chen, G. Ferguson, A. Jessop, M. Kelman, et al., 2012, Geothermal Energy Resource Potential of Canada, Rapport public, 6914, Rev. <https://doi.org/10.4095/291488>
- Institut de la statistique du québec. 2020. La production minérale au Québec en 2018, Mines en chiffres, p. 1-14. www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/mines-chiffres-2020.pdf
- Ngoyo Mandemvo, D. D., 2019, Potentiel géothermique des mines abandonnées de Société Asbestos Limitée (SAL) à Thetford Mines au Québec, Canada, cas de la mine King Beaver, Mémoire de maîtrise, Mons, Université de Mons
- Ngoyo Mandemvo, D. D., 2020, Ma recherche en série : la maîtrise en sciences de la Terre de Dan Ngoyo Mandemvo, Québec, Institut nationale de la recherche scientifique (INRS), Consulté en janvier 2022, <https://bit.ly/34m02xc>
- Peralta Ramos, E., K. Breede, and G. Falcone. 2015. Geothermal Heat Recovery from Abandoned Mines: A Systematic Review of Projects Implemented Worldwide and a Methodology for Screening New Projects. *Environmental Earth Sciences* 73 (11): 6783–95. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2020. Activité minières - Carrières et sablières. 1 : 20 000. Consulté en février 2022. <https://geoapp.bibl.ulaval.ca/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2020. Activité minières – Mines actives. 1 : 20 000. Consulté en février 2022. <https://geoapp.bibl.ulaval.ca/>
- Raymond, J., 2010, Geothermal system optimization in mining environment, Thèse de Doctorat, Québec, Université Laval. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/21596>
- Raymond, J., and R. Therrien, 2008, Low-Temperature Geothermal Potential of the Flooded Gaspé Mines, Québec, Canada. *Geothermics* 37 (2): 189–210. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.10.001>
- Raymond, J., R. Therrien, and L. Gosselin, 2010, Low-Temperature Geothermal Energy in Mining Environments, *CIM Journal* 1 (2): 11
- Raymond, J., R. Therrien, and F. Hassani, 2008, Overview of Geothermal Energy Resources in Québec (Canada) Mining Environments, *Proceeding of the 10th International Mine Water Association Congress, Karlovy Vary*, 12
- Verhoeven, R., E. Willems, Vi. Harcouët-Menou, E. De Boever, L. Hiddes, P. Op't Veld, and E. Demollin, 2014, Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling, *Energy Procedia* 46: 58–67, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158>



Période de questions
