

## Les interférences géochimiques dans les projets de géothermie en système ouvert

**Auteur :** François, Constance

**Promoteur(s) :** Brouyère, Serge; Orban, Philippe

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénieur et de l'environnement

**Année académique :** 2024-2025

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/24925>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**Titre :** Les interférences géochimiques dans les projets de géothermie en système ouvert

**NOM Prénom :** FRANCOIS Constance

**Section :** Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénieur et de l'environnement

**Année académique :** 2024-2025

**Promoteur académique :** BROUYÈRE Serge

**Résumé :** La transition énergétique impose une diminution de la consommation d'énergies fossiles. La géothermie fait partie des formes d'énergie envisagées pour atteindre cet objectif. Elle permet d'exploiter la chaleur présente dans le sous-sol. Deux principaux types de systèmes géothermiques existent : les systèmes fermés et les systèmes ouverts. Ces derniers reposent sur le pompage et la réinjection d'eau souterraine. Cependant, leur développement peut présenter certaines limites, notamment l'apparition d'interférences géochimiques. Elles peuvent impacter le fonctionnement et la durabilité des installations mises en place, principalement via des problèmes de colmatage des installations. L'étude des interférences géochimiques dans les projets de géothermie en système ouvert constitue l'objectif principal de ce travail de fin d'études.

Dans un premier temps, des recherches bibliographiques ont permis d'identifier différents problèmes rencontrés dans les systèmes géothermiques ouverts. Le principal est le colmatage des installations par précipitation de minéraux carbonatés ou de minéraux de fer et de manganèse. Ce phénomène résulte de la variation des paramètres de base de l'eau souterraine. En effet, lorsque l'eau est chauffée pour les besoins énergétiques, sa température varie. De la même façon, lors du pompage, l'eau entre en contact avec l'atmosphère, entraînant la perte de dioxyde de carbone et la dissolution d'oxygène. Ces variations modifient l'équilibre chimique et favorisent la précipitation de certains minéraux.

Dans un second temps, le travail se base sur des cas concrets afin d'évaluer l'influence de la composition de l'eau sur le fonctionnement des systèmes géothermiques ouverts. Les sites d'étude correspondent à des projets développés par l'entreprise Artesia. Des échantillons y ont été prélevés et analysés à l'aide du logiciel de modélisation hydrochimique PHREEQC.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'impact de la variation de plusieurs paramètres sur le risque de colmatage. Les minéraux carbonatés, sensibles aux variations de température, précipitent plus facilement lorsque l'eau se réchauffe. Un pH acide réduit significativement ce risque de précipitation. En ce qui concerne le fer et le manganèse, leur précipitation dépend des conditions rédox du milieu. Les conditions oxydantes ne sont pas uniquement liées à la présence d'oxygène dissous, mais également à la présence d'autres couples rédox comme  $NH4^+ / NO_3^-$ . Si les conditions oxydantes suffisent à oxyder les métaux avant l'introduction d'oxygène dans le système, le fer et le manganèse seront déjà sous forme de phases minérales dans l'encaissant géologique et ils ne précipiteront pas pendant le pompage. Dans le cas contraire, l'oxygénéation de l'eau au cours des opérations de pompage peut entraîner la précipitation des minéraux secondaires associés à ces éléments au sein des équipements géothermiques.

Pour finir, ce travail propose plusieurs recommandations pour des futures études. Divers paramètres, tels que la température, le pH et l'oxygène dissous, doivent être mesurés sur le terrain lors du prélèvement des échantillons d'eau. La mesure de ces paramètres est nécessaire pour connaître les conditions du milieu et prédire le risque de colmatage. De plus, il est important que les concentrations totales et dissoutes de fer et de manganèse soient analysées en laboratoire. Ces mesures rendent compte de l'état d'oxydation du milieu naturel.

**Mots-clés :** géothermie - interférence géochimique – colmatage – précipitation

**Abstract :** The energy transition requires a reduction in fossil fuel consumption. Geothermal energy is among the energy sources considered to achieve this goal, as it allows the exploitation of heat stored in the subsurface. Two main types of geothermal systems exist: closed-loop and open-loop systems. The latter rely on the pumping and reinjection of groundwater. However, their development can face certain limitations, particularly the occurrence of geochemical interferences. These interferences can affect both the performance and the durability of the installations, through clogging issues. The study of geochemical interferences in open-loop geothermal projects constitutes the main objective of this thesis.

In a first stage, a literature review identified the main issues encountered in open-loop geothermal systems. The most significant one is clogging due to the precipitation of carbonate minerals or iron and manganese minerals. This phenomenon results from variations in the fundamental parameters of groundwater. Indeed, when water is heated for energy purposes, its temperature changes. Similarly, during pumping, water comes into contact with the atmosphere, leading to the loss of carbon dioxide and the dissolution of oxygen. These changes alter the chemical equilibrium and promote the precipitation of certain minerals.

In a second stage, the study focuses on real case studies to assess the influence of water composition on the operation of open-loop geothermal systems. The study sites correspond to projects developed by the company Artesia. Water samples were collected and analysed using the hydrochemical modelling software PHREEQC.

This work highlighted the impact of variations in several parameters on clogging risk. Carbonate minerals, which are sensitive to temperature changes, precipitate more readily as water warms. An acidic pH significantly reduces this precipitation risk. About iron and manganese, their precipitation depends on the redox conditions of the environment. Oxidizing conditions are not only linked to the presence of dissolved oxygen, but also to the presence of other redox couples such as  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ . If oxidizing conditions are sufficient to oxidize metals before oxygen is introduced into the system, iron and manganese will already be present as mineral phases in the host rock and will not precipitate during pumping. Conversely, if this is not the case, oxygenation of the water during pumping operations may lead to the precipitation of secondary minerals associated with these elements within the geothermal equipment.

Finally, this work proposes several recommendations for future studies. Parameters such as temperature, pH, and dissolved oxygen must be measured in the field during water sampling. Measuring these parameters is essential to determine in-situ conditions and predict clogging risks. Furthermore, both total and dissolved concentrations of iron and manganese should be analysed in the laboratory, as they provide insights into the oxidation state of the natural environment.

**Keywords:** geothermal energy – geochemical interference – clogging – precipitation