



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

geo
Ressources



Intitulé de la thèse de doctorat

Impact de l'activité bactérienne sur le stockage géologique souterrain de H₂

Sujet de thèse

L'hydrogène (H₂) est considéré comme un vecteur d'énergie renouvelable propre et durable offrant des perspectives prometteuses, qui pourraient remplacer les énergies fossiles dans un avenir proche. Cela conduit à développer des solutions de stockage d'hydrogène à grande échelle pour répondre aux demandes énergétiques et atténuer l'intermittence de l'énergie éolienne et solaire. Si le stockage en cavités salines apparaît aujourd'hui comme une des solutions les plus intéressantes, garantissant une stabilité et une étanchéité à long terme, ces cavités ne sont pourtant pas présentes partout. D'autres alternatives doivent donc être envisagées telles que le stockage en aquifères salins ou réservoirs déplétés.

A l'heure actuelle, cependant, le stockage géologique de H₂ reste très peu étudié malgré le comportement spécifique de ce gaz (forte réactivité et mobilité). Une meilleure compréhension des mécanismes en jeu est donc essentielle pour mieux évaluer la viabilité économique et l'impact environnemental. Un point clé du développement d'une telle technologie est de caractériser et de contraindre les processus susceptibles d'altérer (dégradation biotique de l'H₂) qualitativement et quantitativement la ressource dans le cadre du stockage dans les roches réservoirs poreuses. En tant que donneur d'électrons majeur pour les processus microbiens souterrains, H₂ pourrait soutenir une croissance de micro-organismes dans des conditions oligotrophes dans des environnements profonds si des accepteurs d'électrons sont suffisamment bio-disponibles tels que le nitrate (NO₃⁻), le fer ferrique (Fe^{III}), le sulfate (SO₄²⁻) ou le dioxyde de carbone (CO₂). A ce jour, comprendre la contribution des micro-organismes consommateurs d'H₂ au cycle biogéochimique de l'hydrogène est d'importance majeure pour un certain nombre d'industries souterraines dont celles liées au stockage d'H₂ dans un contexte de transition énergétique. En particulier, l'activité bactérienne est susceptible de produire du méthane (CH₄) ou de l'hydrogène sulfuré (H₂S) au détriment de l'H₂.

L'objectif principal de cette thèse sera alors d'évaluer la cinétique de consommation d'H₂ par des souches modèles bactériennes et des consortia multi-bactériens dans des conditions physico-chimique proches de celles du stockage géologique en termes de température, pression, concentration en sel et disponibilité en accepteurs d'électrons. Trois niveaux d'expérimentation pourraient être conçus pour reproduire ces conditions de stockage :

- **Expérimentations en réacteurs fermé de type *batch*** : il pourrait s'agir dans un premier temps d'étudier diverses souches de collections hydrogénotrophes (eg, halophiles, thermophiles, piézotolérantes) susceptibles de vivre dans les conditions typiques de certains réservoirs souterrains et de les incuber dans des milieux à définir proches de ces conditions (fortes salinité, température et pressions élevées) en présence de divers accepteurs d'électrons. Pour les bactéries hydrogénotrophes les accepteurs terminaux d'électrons à considérer, car classiquement présents dans les milieux souterrains sont Fe^{III} (phases

minérales ferriques), le sulfate (SO_4^{2-}), et le di-oxyde de carbone (CO_2). Certaines souches pures (e.g. *Shewanella oneidensis* MR-1, *Thermotoga subterranea*,...) et des consortiums multi-espèces pourraient être testés quant à leur capacité à supporter des pressions croissantes d'hydrogène. Des expériences avec des réacteurs discontinus à haute pression (jusqu'à 100 bar) et à haute température (55-65°C) seraient réalisées pour surveiller la consommation d'hydrogène par chromatographie en phase gazeuse (CG). La réduction des accepteurs d'électrons (Fe^{III} et sulfate notamment) pourra être suivie par dosage colorimétrique de Fe^{II} (réaction à la ferrozine ou à la phénanthroline) et de SO_4^{2-} par chromatographie ionique (ou des sulfures par colorimétrie). Les transformations des accepteurs solides d'électrons (e.g. oxydes de fer) pourront être également suivies par les techniques d'analyse du solide (XPS, spectroscopie Raman, XRD voire spectroscopie Mössbauer). Le suivi de l'abondance relative des espèces bactériennes pourra être réalisée par toute technique appropriée (e.g. analyses des séquences spécifiques d'ADN16S, ou de tout autre gène ciblé). L'abondance des cellules bactériennes non spécifiques pourra être suivie par microscopie optique sous épifluorescence des cellules marquées non spécifiquement par un fluorochrome des acides nucléiques (DAPI, SYBR, ...).

- **Expériences en colonne** : Des essais de percolation de l' H_2 dissous pourront alors être réalisés dans un second temps à partir des souches ou groupes d'espèces hydrogénotrophes, retenus dans la première partie, en colonne poreuse saturée d'eau (grès concassé) et enrichie en accepteur d'électrons. Les essais seront menés sur les souches pures ou multi-espèces en consortium préalablement étudiées en réacteur fermé. Des analyses post-expérimentales (e.g. XRD, MEB, etc.) seront également réalisées pour caractériser les néo-minéralisations potentielles, dénombrer les bactéries et caractériser la présence et la croissance de bactéries en biofilms.
- **Expériences sur carotte** : Enfin, afin de se rapprocher encore plus des conditions in situ, des essais d'injection de gaz dans une cellule mécanique triaxiale (c'est-à-dire des essais de percolation) alimentés par des générateurs de pression de fluide seront menés sous haute température, haute pression et haute contrainte sur des carottes rocheuses partiellement saturées. Les expériences seront réalisées en présence de bactéries hydrogénotrophes sous une pression de gaz de 50 bars, une contrainte de confinement jusqu'à 200 bars et une température ambiante jusqu'à 60 degrés. Différents tests seront réalisés en faisant varier les conditions d'injection (débit, degré de saturation). Le prélèvement de gaz en sortie sera analysé par GC afin de quantifier la consommation d'hydrogène et la production potentielle de gaz annexe (H_2S). A l'issue des expériences, l'échantillon final sera analysé par nano-tomographie 3D à rayons X pour caractériser la répartition microscopique de la fraction fluide à l'intérieur du milieu poreux.

Sur la base de ces données, une approche numérique pourra être menée : Une modélisation géochimique des interactions fluide-roche catalysées par des bactéries au sein de la formation rocheuse sera réalisée en utilisant des outils de modélisation géochimiques (e.g., PhreeqC).

Ce travail sera réalisé au sein du laboratoire [GeoRessources](#) et en collaboration avec [le LCPME](#).

Profil de l'étudiant.e : Le candidat doit être une personne très motivée et autonome avec de solides connaissances en microbiologie. Idéalement, le candidat doit être titulaire d'un master universitaire récent (ou équivalent) en microbiologie, biologie moléculaire, bioingénierie biologique, géochimie

environnementale ou autres domaines pertinents. Un intérêt marqué pour les expérimentations en laboratoire est requis.

Il ou elle peut démontrer une compétence en particulier en physiologie microbienne, en biologie moléculaire et en microbiologie générale. Des connaissances de base en géochimie et une motivation pour travailler à l'interface entre disciplines seront appréciées. Des compétences en hydrogéologie ou en géomécanique ne sont pas indispensables, l'étudiant(e) sera accompagné(e) et assisté(e) par du personnel technique au sein du laboratoire pour tout ce qui a trait aux essais en colonne et de percolation sur carotte (utilisation des générateurs de pression, monitoring des essais et mesure des débits). Le candidat devra maîtriser l'anglais. Le français n'est pas obligatoire mais la volonté d'apprendre le français sera appréciée.

Financement : Cette thèse est financée pour 3 ans, à partir du 1^{er} Octobre 2022 dans le cadre du programme Lorraine Université d'Excellence ([LUE](#)). Le salaire brut est de 1975€/mois. Les candidats doivent envoyer par email leur Curriculum Vitae, copie de leur mémoire de master et les noms et adresses mail de deux référents à:

Contacts

Fabrice GOLFIER (Responsable, GeoRessources) : fabrice.golfier@univ-lorraine.fr

Frédéric JORAND (Co-encadrant, LCPME): frederic.jorand@univ-lorraine.fr

La date limite pour les candidatures est le 3/06/2022.