

DESCRIPTION D'UN PROJET DE THÈSE FINANCÉ - ÉCOLE DOCTORALE « Matière, Molécules, Matériaux & Géosciences »

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Hydrogène naturel dans le Massif Armoricaïn : de la source à la fuite
Champ disciplinaire 1 : Géosciences Champ disciplinaire 2 :
Trois mots-clés : Hydrogène naturel ; interaction fluide/roche ; Massif Armoricaïn
Unité d'accueil (préciser si temps partagé entre plusieurs sites) : LPG UMR 6112 Géosciences - Le Mans Université
Nom, prénom du directeur de thèse (HDR indispensable) : Zanella Alain Adresse mail : alain.zanella@univ-lemans.fr Nom, prénom du co-encadrant de thèse 1 (le cas échéant) : Roche Vincent Adresse mail : vincent.roche@univ-lemans.fr Nom, prénom d'un collaborateur (le cas échéant) : Branquet Yannick Adresse mail : yannick.branquet@univ-rennes.fr
Contact(s) (adresse postale) : vincent.roche@univ-lemans.fr / LPG - Le Mans -Avenue Olivier Messiaen 72085 LE MANS cedex 9

ED 3MG - Direction : Le Mans Université - Avenue Olivier Messiaen - 72085 Le Mans Cedex 09
 Tél : 02.43.83.37.41 / 06.05.19.08.00
 Mail : ed-3mg@doctorat-paysdelaloire.fr
 Site Web : <https://ed-3mg.doctorat-paysdelaloire.fr/>

Contexte scientifique

La transition énergétique nécessite une meilleure utilisation et compréhension des ressources naturelles propres. L'hydrogène, élément le plus abondant dans notre univers, devient de ce fait un enjeu majeur comme future source d'énergie verte. Paradoxalement, à ce jour, l'hydrogène est généré à plus de 95% à partir d'énergie fossile impliquant des émissions de gaz à effet de serre et/ou par l'électrolyse de l'eau (~5%) qui est un processus énergivore, en eau et en ressources, et onéreux (6-7 euros/kg). Actuellement, l'hydrogène n'est donc pas une ressource décarbonée viable. Cependant, la découverte fortuite de la société Hydroma au Mali a récemment tout bouleversé. Celle-ci a montré aux mondes scientifique et industriel que l'hydrogène naturel peut être accumulé et stocké dans le sous-sol par des voies naturelles. Ainsi, il existe une opportunité significative d'accélérer le développement de la production d'hydrogène, et l'Europe et la France doivent y participer activement.

En France, plusieurs émanations d'hydrogène ont été reportées et étudiées (e.g., dans le bassin minier Lorrain, dans les Pyrénées ou des permis d'exploration ont récemment étaient déposés). Au niveau des Pays de la Loire, et plus généralement dans l'Ouest de la France, les sources naturelles d'hydrogène n'ont pas encore été explorées bien que quelques mesures de surface semblent indiquer sa présence (Figure 1). Au regard de son contexte géologique, le Massif Armoricain est un candidat très sérieux en termes de ressources. Il présente une diversité fascinante de roches qui contiennent de nombreux minéraux riches en fer et éléments radioactifs (Figure 1), reconnus pour générer de l'hydrogène (Lévy et al., 2023). Ce massif est en partie recouvert à l'est par le Bassin de Paris et il n'est pas à exclure que certaines formations sédimentaires actent comme réservoirs, piégeant ainsi l'hydrogène au cours du temps (même si la diffusivité de ce gaz est forte à travers la plupart des unités géologiques). En effet, le travail récent réalisé par Lefeuvre et al. (soumis) montre que certains forages localisés dans le Bassin de Paris contiennent également de l'hydrogène, et que ce dernier a été détecté dans quatre formations: l'aquifère lusitanien, l'aquifère du Dogger, l'aquifère triasique et dans le socle.

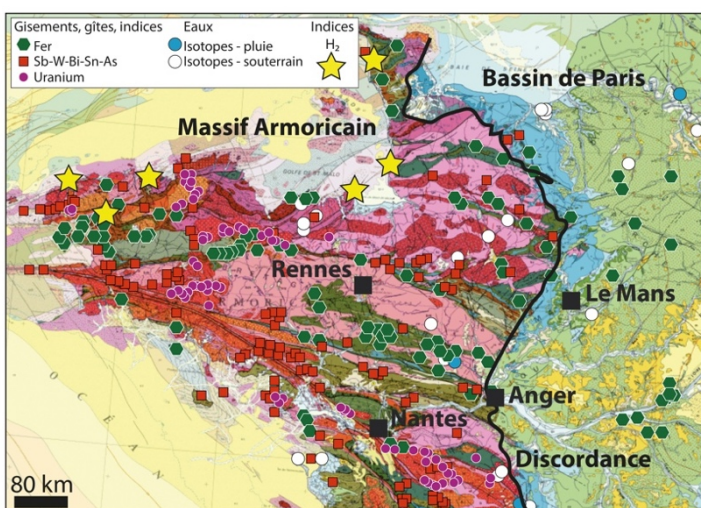


Figure 1 : Carte géologique synthétique montrant les principales structures tectoniques, la distribution des gisements, les données isotopiques des eaux (d'après le BRGM), ainsi que les émanations d'hydrogène. Noter également la présence de nombreux indices de Fer (processus d'oxydo-réduction) et d'Uranium (processus de radiolyse), éléments essentiels dans la génération d'hydrogène naturel.

Objectifs scientifiques

La thèse vise donc à étudier les potentiels systèmes hydrogènes dans le domaine continental du grand Ouest en France, et plus particulièrement dans le Massif Armoricain et sa couverture sédimentaire qui comprend les Pays de la Loire et la Bretagne. Les objectifs principaux seront (i) d'identifier à l'échelle du Massif Armoricain des anomalies positives de fuites d'hydrogène ; puis dans un second temps (ii) d'étudier les différents processus qui génèrent l'hydrogène (e.g., serpentinisation, hématisation,

pyritisation) en caractérisant les interactions fluide-roche ; et finalement comprendre les chemins de migration des fluides. La finalité d'une telle étude serait donc d'apporter de nouvelles connaissances sur ces systèmes afin de rendre plus efficiente l'exploration en proposant de nouveaux modèles génétiques.

Méthodes

Approche de terrain - de la source profonde à la fuite (60%)

- En regroupant des données disponibles dans la littérature (données pétrologiques, minéralogiques géochimiques, géophysiques et géologiques à différentes échelles et profondeurs), le ou la candidate identifiera les zones favorables à la formation d'hydrogène. La télédétection pourra également être utilisée pour prospecter les émanations de gaz (Figure 2a).
- Une fois identifiées, des analyses de terrain (Variotec et/ou GA 5000, capteurs de gaz) seront réalisées afin de voir rapidement la teneur en hydrogène (Figure 2b). Une étude à maille serrée et multi-gaz (Hélium, CO₂, CH₄) sera ensuite réalisée sur les sites montrant une teneur « anormale » suffisante en hydrogène. Cela permettra une caractérisation spatiale 2D des zones de fuite mais aussi une première évaluation de l'origine de l'hydrogène (mantellique, biologique...).
- Différentes méthodologies seront alors utilisées pour contraindre la dynamique du système. Les données à acquérir incluraient par exemple (i) des analyses géochimiques sur gaz et/ou eau (chromato-gazeuse, isotopie des isotopes stables) combinées à des analyses sur roche (Figures 2c et 2d) pour comprendre les interactions fluide-roche en profondeur, (ii) des analyses géophysiques avec l'acquisition de profils sismiques combinés à des profils électriques et électromagnétiques pour montrer les hétérogénéités du sous-sol (e.g., failles, réservoirs).

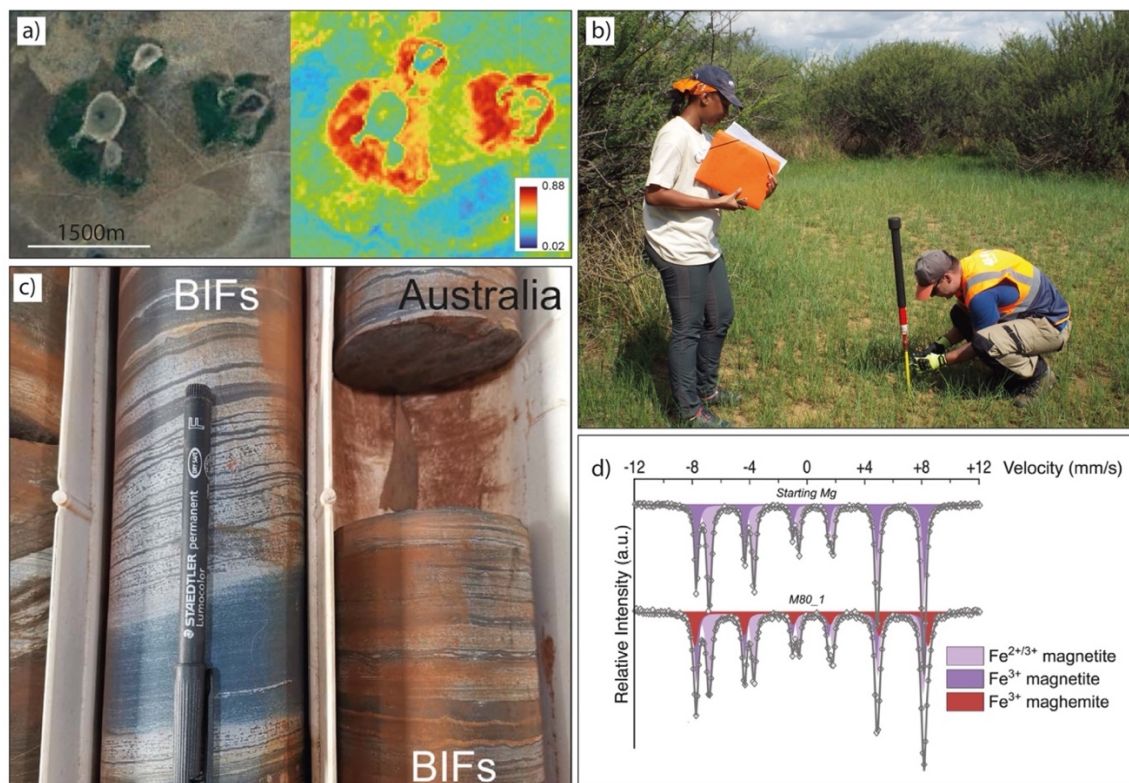


Figure 2 : Approche de terrain. a) Image Google Earth et Indice de Végétation calculé à partir des images Landsat au Brésil montrant des structures circulaires où des mesures d'hydrogène ont été réalisées. b) Échantillonnage de gaz en Namibie dans une structure circulaire. c) Formation rubanée riche en fer provenant d'un forage en Australie. La magnétite est considérée ici comme génératrice d'hydrogène. d) Analyses Mossbauer pour quantifier les rapports Fe^{II}/Fe^{III} dans un échantillon de roche rubanée. Plus la teneur en Fe^{II} est élevée, plus l'échantillon peut générer de l'hydrogène en s'oxydant.

Approche numérique - Échelle du système Hydrogène (e.g., faille, réservoir) (40%)

- Le ou la candidate réalisera des modèles numériques pour comprendre les processus physico-chimiques qui contrôlent la circulation des fluides dans la croûte et la formation d'hydrogène. La personne recrutée se concentrera principalement sur la partie descendante des fluides dans le socle, soit dans un milieu poreux et fracturé en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics™. Des logiciels de bassin (e.g., Temis Flow) pourront ensuite être utilisés pour discuter des possibilités d'accumulation et de stockage de l'hydrogène dans le sous-sol par des voies naturelles.

Compétences scientifiques et techniques requises pour le candidat :

- Un diplôme de master en Sciences de la Terre est requis.
- Des connaissances transverses en géologie (socle, bassin, pétrologie, géofluides, analyse structurale, géochimie) et un gout affiché pour cette transversalité.
- Des connaissances en physique des circulations fluides en milieux poreux fracturés très appréciées.
- Compétences en SIG nécessaires (niveau analyse thématique ou spatiale).
- Compétences en programmation appréciées mais pas obligatoires.
- Bonne maîtrise (oral et écrite) de l'anglais.
- Le permis B est recommandé.

 **ENCADREMENT DE LA THÈSE¹**

Nom de l'unité d'accueil : LPG UMR 6112	Nom de l'équipe d'accueil : Thème Terre
Nom du directeur de l'unité : Langlais Benoit	Nom du responsable de l'équipe : Zanella Alain
Coordonnées du directeur de l'unité : Benoit.langlais@univ-nantes.fr	Coordonnées du responsable de l'équipe : alain.zanella@univ-lemans.fr
Directeur de thèse Nom, prénom : Zanella, Alain Fonction : MCF Date d'obtention de l'HDR : 27/08/2021 Employeur : Le Mans Université Taux d'encadrement doctoral dans le présent sujet : 40% Taux d'encadrement doctoral en cours (directions et co-directions) : 70% Nombre de directions/co-directions de thèse en cours : 1 direction	

¹ Dans l'ED 3MG, si 1 scientifique dans la direction de la thèse = 100% d'encadrement doctoral ; si 2/3 personnes impliquées dans l'encadrement de la thèse, un taux de 40% minimum est exigé pour l'HDR directeur et 30% pour les autres encadrants.

Co-encadrant de thèse 1 (le cas échéant)

Nom, prénom : Roche, Vincent

Fonction : MCF

Titulaire de l'HDR : oui non Si oui, date d'obtention de l'HDR :

Employeur : Le Mans Université

École doctorale de rattachement : 3MG

Taux d'encadrement doctoral dans le présent projet : 60%

Taux d'encadrement doctoral en cours (directions/co-directions/co-encadrements) : 0%

Nombre de directions/co-directions/co-encadrements de thèse en cours : 0%

**FINANCEMENT DE LA THÈSE****Origine(s) du financement de la thèse : Le Mans Métropole****Montant brut mensuel : 2044 € brut/mois - 2300 € brut/mois (avec mission complémentaire enseignement)****État du financement de la thèse : Acquis****Date du début/durée du financement de la thèse : 01/10/2024 - 36 mois**