



Proposition de Thèse

H₂-Natif dans les systèmes ophiolitiques ultrabasiques et réservoirs : processus et cinétique des interactions eau-ophiolites-H₂ dans les systèmes réservoirs : cas d'étude des ophiolites ultrabasiques du Jurassique, Albanie

Contexte scientifique. La serpentinisation génère naturellement de l'H₂ sur Terre. Le processus est inhérent à l'hydratation des roches du manteau sur une large plage de température allant de 50 à 350°C. Les émanations naturelles d'H₂ sont signalées à terre, entre autre dans d'anciennes roches océaniques présentes dans des complexes ophiolitiques comme au Sultanat d'Oman, aux Philippines et en Turquie. Ces fuites de gaz sont souvent associées à des sources ultrabasiques (pH 10-12) présentes dans de nombreux affleurements rocheux basiques-ultrabasiques. Les eaux ultrabasiques ont été interprétées comme des preuves de serpentinisation active. Dans les milieux ophiolitiques, on suppose généralement que cela se produit à des températures inférieures à 150 voir 100°C (Abrajano et al., 1988; Etiope et al., 2011). Le processus à l'origine de la production d'H₂ est la réduction de l'eau et l'oxydation concomitante du fer ferreux (Fe²⁺) présent dans les minéraux ultramafiques (olivine et pyroxène) en fer ferrique (Fe³⁺) que l'on retrouve notamment dans le magnétite néoformées. Ces assemblages minéraux sont observés sur le terrain, où les péridotites sont largement serpentinisées, principalement le long des systèmes de fractures.

L'objet d'étude est le massif ophiolitique de Bulqizë, peu connu et peu étudié en relation avec la problématique de l'H₂ natif (Fig. 1). Il fait partie des ophiolites téthysiennes du système orogénique alpin qui se mettent en place le long d'une zone de suture curviligne délimitant une série de fragments continentaux dérivés du Gondwana (les Pouilles, Pelagonia, système complexe cristallin d'Anatolie centrale) et représentent les restes des bassins téthysiens marginaux qui ont évolué entre ces microcontinents. Le massif ophiolitique de Bulqizë s'étend sur une vaste superficie de 370 km² et comprend environ 400 occurrences connues de minéralisation de chromite podiforme (Fig. 1). Le premier travail effectué au sein de la mine de chromite de Bulqizë-Batra donne un cadre général aux recherches ici proposées. Cette mine est un laboratoire souterrain pour étudier, la genèse, la migration et le piégeage de l'H₂ natif. Il peut permet donc de tester et de mettre au point des méthodes d'exploration pour cette éventuelle ressource primaire d'énergie décarbonée. Les premières analyses d'H₂, des gaz associés, des flux et des quantités ont fait l'objet d'une première publication (Truche et al., 2024).

Le projet de thèse s'articule autour de 3 axes de recherche :

L'axe 1 concerne la **cartographie dans l'espace et dans le temps des émanations d'H₂ dans la mine de Bulqizë**. Il s'agira de caractériser les chemins de migration d'H₂ dans le massif. Dans la mine de Bulqizë, les émanations d'hydrogène ne sont observées que dans les niveaux profonds et semblent être corrélées à la présence d'une grande zone de faille. Cependant, nous ignorons quelles sont les générations de fractures drainants le gaz et s'il existe une zone de couverture empêchant les fuites vers la surface. Des précipitations de halite (NaCl) ont été observées au niveau de fractures situées dans les zones où l'hydrogène est détecté. Nous souhaitons donc pouvoir cartographier les émanations de gaz et les suivre dans le temps en profitant de ce laboratoire souterrain unique au monde qu'est la mine de Bulqizë. Les mesures seront réalisées à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse transportable (micro-GC) disponible au laboratoire ISTerre de Grenoble, pouvant être installé dans les galeries de la

mine et connecté à différents forages (shot-holes, forage d'exploration, réseau de forages drainant, fractures) afin de suivre dans l'espace et dans le temps les variations de composition, et les débits de gaz. Ces mesures nous permettront de caractériser certaines propriétés du réservoir et de comprendre pourquoi celui-ci ne fuit pas en surface (tout du moins en l'apparence).

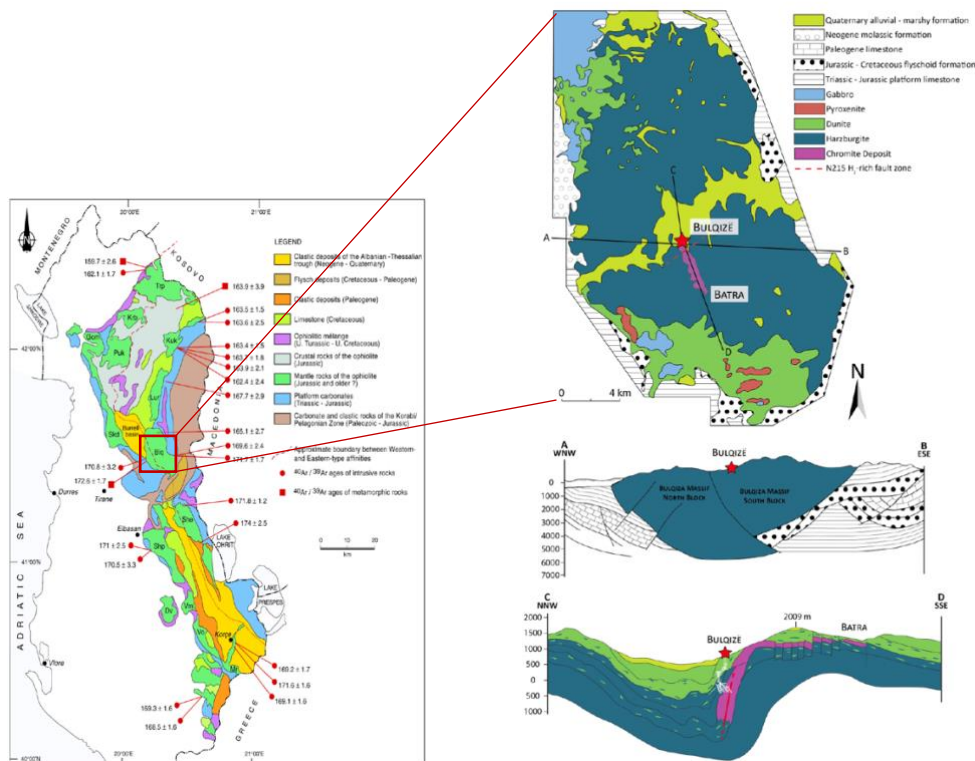


Figure 1 : A) Carte géologique des ophiolites albanaises et des unités environnantes (modifiée de Dilek et al., 2005) ; B) Carte géologique simplifiée du massif ultramafique de Bulqizë avec projection en surface du gisement de minerai et de la zone de faille profonde riche en H₂. En bas : coupes géologiques le long des transects A-B et C-D (Truche et al., 2024).

L'axe 2 de recherche tentera de comprendre : i) les processus physico-chimiques de production d'hydrogène en relation avec les niveaux riches en fer dans le massif ophiolitique ultramafique ; ii) les cinétiques de production en fonction de la composition minéralogique de la roche et de la paragenèse ; iii) l'identification des transformations minérales en fonction du niveau d'altération des roches, pression et température, pH... ; iv) l'identification des catalyseurs et/ou inhibiteurs entrant en jeu.

Pour cela, à l'échelle de la mine et du massif de Bulqizë, seront prélevés des échantillons des différents faciès des roches ultramafiques avec des niveaux variables de serpentinisation. Par ailleurs, les minéraux remplissant les fractures seront prélevés afin de comprendre la cinématique et la dynamique de circulation des fluides dans le réseau de fractures. Plusieurs types d'analyses sont prévues : des analyses ICP seront effectuées pour déterminer les concentrations globales totales des éléments d'intérêt tels que Fe, Cr, Ni, Co et PGE; ii) des analyses sur des roches riches en fer via la spectroscopie de Mössbauer permettrait de déterminer la spéciation du Fe. Les roches riches en Fe²⁺ doivent être considérées comme des roches génératrices d'un potentiel élevé d'H₂ en ce qui concerne le processus rédox alors que les roches riches en Fe³⁺ ne doivent pas être considérées comme des roches potentiellement génératrices d'H₂. Grâce à cette méthode, l'état rédox sera obtenu pour chaque minéral constitutif de l'échantillon de roche.

L'identification des minéraux porteurs de Fe²⁺, Cr, Ni, et Co sera effectuée sur des lames minces par microscopie optique et MEB. Une cartographie des minéraux et éléments permettra à partir d'images MEB couplées avec les analyses élémentaires de type sonde WDS d'identifier les minéraux ferreux. Leur identification devrait permettre d'évaluer le potentiel de production d'H₂ de la roche, en fonction de la bonne réactivité de chaque minéral lors des interactions eau-roche. Enfin, des analyses XCT seront

réalisées sur des carottes pour extrapoler à plus grande échelle les quantifications et observations faites à petite échelle, et ainsi estimer le véritable potentiel de la source d'H₂ normalisé au volume.

L'analyse de la paragenèse pour séquencer dans le temps les différents processus d'altération des ophiolites par serpentinisation et la datation de ces différentes transformations diagenétiques en relation avec la genèse de l'H₂ apportera un vrai plus sur la connaissance des processus de genèse de l'H₂. Les résultats analytiques obtenus pourraient nous aider comme éléments d'évaluation de l'importance relative des termes sources (serpentinisation et altération des minéraux ferreux) et des termes puits (réaction de type Fisher-Tropsch, consommation microbienne), qui restent encore une source de discussion actuellement.

L'axe 3 a pour objectif de quantifier les propriétés pétrophysiques en relation avec les transformations minéralogiques lors de la genèse de l'H₂. Il s'agit ici : i) de la caractérisation pétrophysique des roches mère et « réservoirs »; ii) de comprendre les transformations minéralogiques de la roche mère et leurs impacts sur les propriétés de transport (surface réactive, porosité, perméabilité) pendant le processus de serpentinisation et de genèse de l'H₂; iii) d'identifier les mécanismes de piégeage de l'hydrogène produit pendant le processus de serpentinisation. Les méthodes d'analyse comportent une série de paramètres tels que : la porosité, la perméabilité, la perméabilité relative, la surface spécifique, la distribution des pores, la pression capillaire, la mouillabilité, le comportement électrique des roches réservoirs via les exposants d'Archie (a, n, m), la NMR, les propriétés mécaniques, les propriétés acoustiques, l'imagerie de tomographie. Cette base de données pétrophysiques sera couplée avec les analyses obtenues dans l'axe 2 en termes de paragenèse et de caractérisation pétrographique de la microporosité développée lors des processus de serpentinisation.

Profil du candidat: Il s'agit d'un profil de formation en géosciences avec de bonnes bases en physique et géochimie des gaz et des eaux appliquées au système réservoir. Des connaissances sur les interactions gaz-eau-roche, en pétrophysique et hydrogéologie seront nécessaires. La connaissance des méthodes analytiques serait un plus pour le déroulement de la thèse. Ce poste requiert également des qualités de communication et d'ouverture d'esprit au travail dans une équipe pluridisciplinaire et d'une partie du travail à effectuer en Albanie. Le candidat devra travailler en collaboration avec les différents partenaires du projet.

La thèse sera en co-encadrement et se déroulera entre deux laboratoires de recherche :

- **UMR EPOC** (Université de Bordeaux) (et hébergé à l'ENSEGID-Bordeaux INP)
- **ISTER** (Université de Grenoble)

Contacts :

Adrian CEREPi : 0681716662, adrian.cerepi@bordeaux-inp.fr

Corinne LOISY : 05 56 84 69 31, corinne.loisy@bordeaux-inp.fr

Laurent TRUCHE : +33(0)6.70.69.13.23, laurent.truche@univ-grenoble-alpes.fr

Début des dépôts de candidature : 01/02/2025

Fin des dépôts de candidature : 10/04/2025

Début de thèse : octobre 2025

Toutes les candidatures doivent comporter les documents suivants : a) un CV; b) une lettre de motivation; c) le nom et les coordonnées de trois personnes pouvant recommander le candidat.