

GÉOL PYR
Redécouvrir la géologie des Pyrénées

22 – De l'Hydrogène « natif » dans les Pyrénées ?

(Version « longue », du 26 Mai 2025)

= ce module est dédié à Jean-Jacques Biteau (1955-2025) =

Avertissement : il faut reconnaître que ce module de Géol Pyr en « version longue », est « gros pavé » de presque 100 pages A4, mais comprenant une centaine de figures explicatives; il était difficile de couvrir un tel sujet innovant, de façon relativement exhaustive, en faisant plus court. Mais si ce sujet vous intéresse vraiment, vous verrez, ça se lit (presque) comme une enquête policière... d'un géologue qui découvre lui-même ce vaste sujet.

Mais il existe aussi une version plus courte, publiée simultanément avec cette version longue, plus conforme à un module standard de standard de Géol Pyr et donc plus accessible et « digeste ».

Dans ce module de Géol Pyr nous abordons un sujet, l'hydrogène dit « blanc », natif ou naturel, en tant que ressource énergétique, que certains considèrent comme un effet de mode, alors que d'autres, de plus en plus nombreux, envisagent qu'il pourrait révolutionner beaucoup de domaines et en particulier contribuer à la décarbonation de notre monde et participer grandement à la transition énergétique.

Nous rappellerons brièvement les divers processus industriels de génération d'hydrogène avec leurs impacts environnementaux et leurs coûts très variables, mais en tant que géologues nous nous focaliserons sur une nouvelle source d'approvisionnement potentielle d'hydrogène, c'est-à-dire l'hydrogène « blanc » ou « natif », créé dans la nature par divers processus physico-chimiques naturels. Et ce qui nous intéresse encore plus, en tant que géologues pyrénéens, c'est que les Pyrénées pourraient justement receler des gisements d'hydrogène natif. L'exploration de l'hydrogène natif vient de démarrer dans le bassin de Mauléon et dans le Comminges. Il faudra attendre les résultats de cette exploration dans quelques années, pour savoir si l'espoir de trouver un gisement d'H₂ natif, économiquement exploitable se concrétise.

1- Introduction: L'hydrogène une question de mode ou avenir révolutionnaire ?

Élément chimique le plus abondant dans l'univers, l'hydrogène (H) est classé en première place du tableau de Mendeleïev. Il s'agit de l'atome le plus simple et le plus léger : il est constitué d'un noyau contenant un proton et un électron périphérique. La molécule H₂ de dihydrogène, constituée de deux atomes d'hydrogène, est aussi communément appelée « hydrogène » (nous emploierons cette terminologie dans ce module). C'est cette molécule H₂ qui fait l'objet d'une exploitation chimique et suscite un fort intérêt énergétique, tant par ses possibilités d'usage que de stockage.

Sur Terre, l'hydrogène réducteur est présent dans une multitude de molécules dont les plus essentielles à la vie : avec l'oxygène, il forme l'eau (H₂O) ; avec le carbone, le méthane (CH₄) et la famille des hydrocarbonates constituant la chimie organique ; avec l'azote, l'ammoniac (NH₃) ; avec les halogènes, les acides forts (comme l'acide chlorhydrique), etc.

L'hydrogène est utilisé dans divers domaines de l'industrie, par exemple en raffinage pétrolier (désulfuration des hydrocarbures) ou en chimie (synthèse de l'ammoniac première étape pour obtenir des engrais azotés).

Sous forme H_2 , c'est principalement un vecteur d'énergie qui doit être produit en l'extrayant de ses composés (charbon, méthane, eau, biogaz ou biomasse, etc.) et qui peut alors réagir puissamment avec les oxydants, en particulier l'oxygène, en dégageant beaucoup d'énergie. Comme vecteur d'énergie, l'hydrogène possède trois aptitudes exceptionnelles :

- la plus grande densité massique d'énergie, 1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole.
- une combustion très énergétique dans l'oxygène avec production d'eau pure. Contrairement à ce qu'on lit parfois, l'hydrogène n'est pas explosif, mais hautement inflammable (par exemple, le dirigeable « Zeppelin Hindenburg » rempli d'hydrogène s'est enflammé à l'atterrissage aux USA en 1937, mais il n'a pas explosé).
- une dualité profonde avec l'électricité, avec une capacité de transformation réciproque directe par électrolyse ou pile à combustible.

Ces trois points majeurs font de l'hydrogène, pour certains, l'atout maître de la décarbonation nécessaire, en le substituant aux énergies fossiles, pour mettre fin à l'emballement climatique en cours. Il est en particulier vu comme une solution à la gestion de l'intermittence des productions éoliennes et solaires (dont H_2 serait le stockeur-déstockeur, permettant ainsi un développement massif de ces filières).

Mais le vecteur d'énergie H_2 présente aussi des inconvénients, car certains processus d'extraction de l' H_2 dégagent beaucoup de CO_2 , ce qui ne les rend guère écologiques. La source historique et principale de l' H_2 est le vaporéformage du gaz naturel qui constitue l' H_2 dit gris, ainsi que le vapoformage du charbon qui constitue l' H_2 dit noir. Ces deux procédés sont très émetteurs de gaz carbonique. Un autre inconvénient majeur est lié à sa faible densité volumique d'énergie. Pour le stocker, le transporter et le distribuer, il faut soit le liquéfier à pression atmosphérique mais à une température extrêmement basse (- 253 °C), soit le comprimer à très haute pression (700 bars), tout en maîtrisant les risques de fuite, de corrosion et d'explosion.

Pour pouvoir substituer une économie « hydrogène » à celle des « hydrocarbures » régnante, il faudrait d'abord savoir produire industriellement le nouveau vecteur énergétique « H_2 décarboné », en quantités supérieures de près de deux ordres de grandeur à l'existant, sans émission de gaz à effet de serre et aussi à un coût raisonnable.

2- L'arc en ciel de couleurs de l'hydrogène en fonction de son origine

On a désormais l'habitude d'attribuer une couleur en fonction de ses différentes voies de production et de son empreinte carbone et sa terminologie, ce que résume le tableau suivant :

	Couleur	Technologie	Source d'énergie ou d'électricité	Empreinte carbone ¹	Terminologie ²
Production via biomasse	Hydrogène vert	Thermolyse	Biomasse	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène vert	Vaporeformage	Biométhane	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
Production via l'électricité	Hydrogène vert	Electrolyse de l'eau	Solaire, éolienne, hydroélectricité	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène rose		Nucléaire	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène jaune		Réseau électrique (FR)	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
Production via les énergies fossiles	Hydrogène bleu	Vaporeformage Gazéification	Gas naturel Charbon + CCUS	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Noir de carbone (co-produit)	/
	Hydrogène gris	Vaporeformage		Elevée (~ 11 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène marron	Gazéification	Lignite	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène noir		Charbon bitumineux	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné

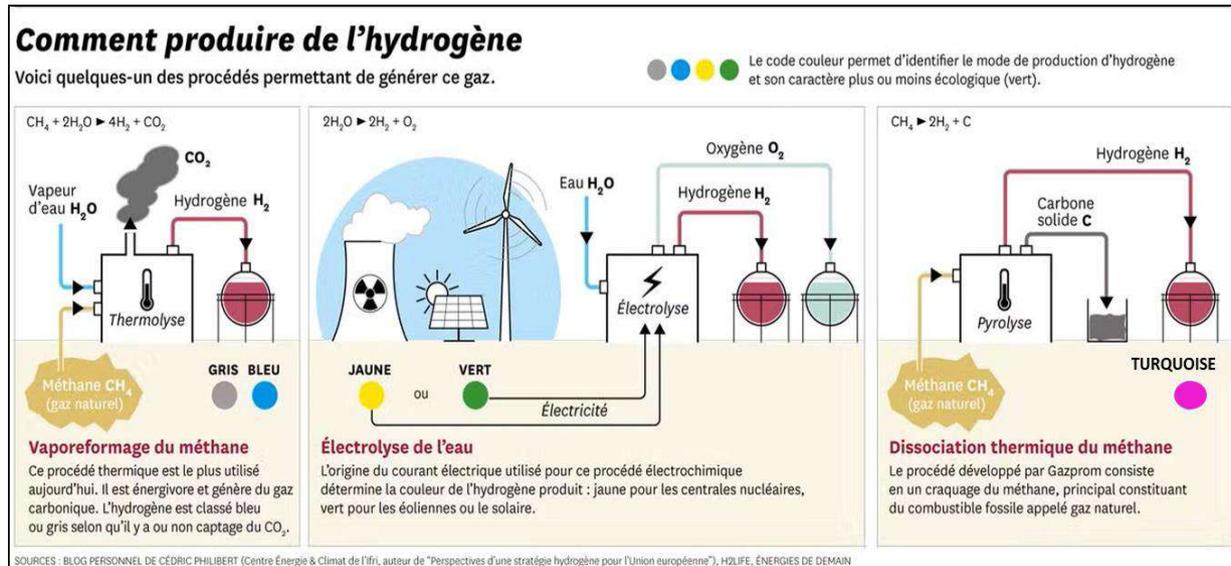
Tableau de classification des couleurs de l'hydrogène en fonction de ses procédés d'extraction et de son empreinte carbone. La dernière colonne « terminologie » reprend la terminologie légale introduite à l'article L811-1 du code de l'énergie en France.

Dans un contexte de recherche effrénée d'énergies alternatives, l'hydrogène est extrait de multiples façons industriellement, certaines plus propres que d'autres. Il est donc classé par couleur, en fonction de la matière première dont il est issu et des émissions de dioxyde de carbone liées à son extraction. Du plus polluant au plus durable :

- hydrogène noir ou brun : extrait par gazéification du charbon, un processus qui transforme le charbon solide, généralement la houille (H₂ noir) et le lignite (H₂ brun) en un gaz riche en hydrogène et en monoxyde de carbone.
 $C + 2 H_2O \rightarrow 4 H_2 + CO_2$: on ne produit que deux molécules d'H₂ pour une molécule de CO₂, pas terrible au point de vue rendement et écologique !
- hydrogène gris : extrait par « reformage » du gaz naturel, un processus qui transforme le méthane et la vapeur d'eau du combustible fossile, en présence d'un catalyseur, en hydrogène et en dioxyde de carbone.
 $CH_4 + 2 H_2O \rightarrow 4 H_2 + CO_2$: on produit une molécule de CO₂ pour 4 molécules d'H₂, ce qui est mieux qu'avec le charbon, mais produit nécessairement du CO₂
- hydrogène jaune : extrait de l'eau par électrolyse, un processus qui la décompose en oxygène et en hydrogène, en utilisant l'électricité du réseau.
 $2 H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$ L'électrolyse de l'eau ne produit pas directement de CO₂, mais indirectement en fonction de l'électricité utilisée.
- hydrogène bleu : extrait du gaz naturel, mais contrairement à l'hydrogène gris, le CO₂ généré au cours du processus est capturé, puis soit utilisé, soit stocké (par exemple dans le sous sol dans des aquifères profonds ou d'anciens gisements pétroliers épuisés) au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère.
- l'hydrogène turquoise est également extrait du gaz naturel, mais par un processus connu sous le nom de pyrolyse du méthane, qui décompose le méthane en hydrogène et en carbone solide au lieu du CO₂, évitant ainsi l'émission de ce gaz à effet de serre.
 $CH_4 \rightarrow C + 2 H_2$ Pas de production de CO₂ contrairement au reformage. Elle nécessite tout de même de l'électricité (pour la pyrolyse) mais 4 à 7 fois moins que l'électrolyse. Ce qui rend ce procédé attrayant. Le « noir de carbone » en tant que sous-produit à une valeur commerciale.

- hydrogène rose : extrait de l'eau par électrolyse, mais contrairement à l'hydrogène jaune, il utilise de l'électricité d'origine nucléaire, ce qui lui confère un faible impact carbone.
- hydrogène vert : également extrait de l'eau par électrolyse, mais contrairement à l'hydrogène rose, il utilise de l'électricité provenant de sources renouvelables (énergie solaire, éolienne ou hydro-électrique), il est donc à faible teneur en carbone et ne produit pas de déchets radioactifs.

Le schéma ci-dessous illustre, bien mieux qu'un tableau, certains procédés industriels de production de l'hydrogène et les couleurs correspondantes. A noter que le procédé à partir de charbon n'est pas mentionné, car de plus en plus décrié pour son impact environnemental.

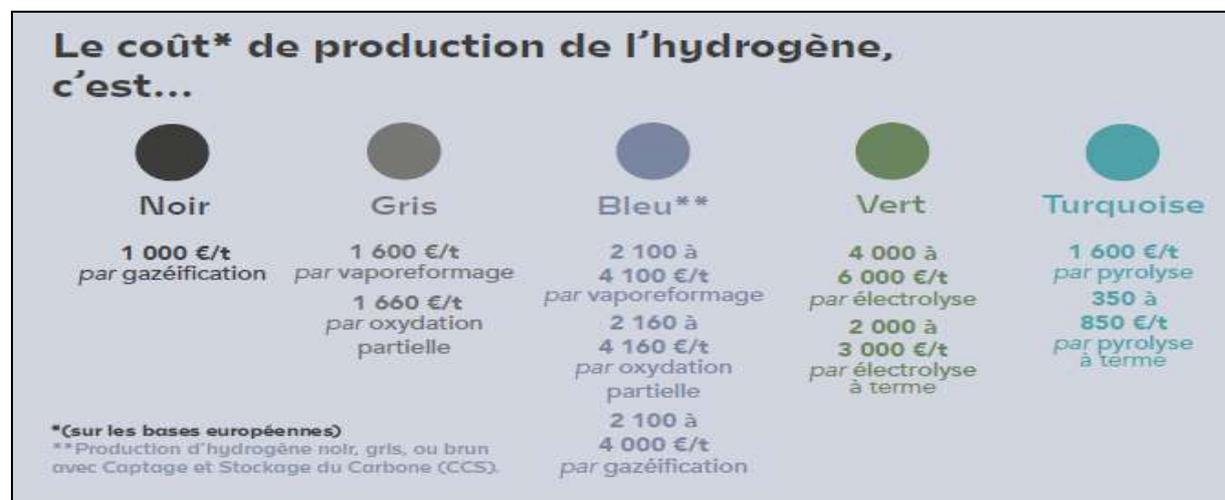


L'aspect économique

Un autre paramètre à prendre en compte est le coût de production de ces hydrogènes de différentes couleurs. Seul un « compromis » entre production de CO₂ (effet de serre) et coût de production, peut rendre certains procédés rentables économiquement et acceptables pour l'environnement.

Le type d'hydrogène le plus courant et le moins cher est l'hydrogène gris, mais le monde évolue vers l'hydrogène vert. C'est le grand pari de l'Union européenne, l'Espagne étant à la pointe de sa production. Nous avons besoin de l'hydrogène vert pour laisser le gaz naturel derrière nous, mais il y a un problème : il est huit fois plus cher !

La figure ci-dessous fournit des coûts de production en fonction de la couleur de l'hydrogène.



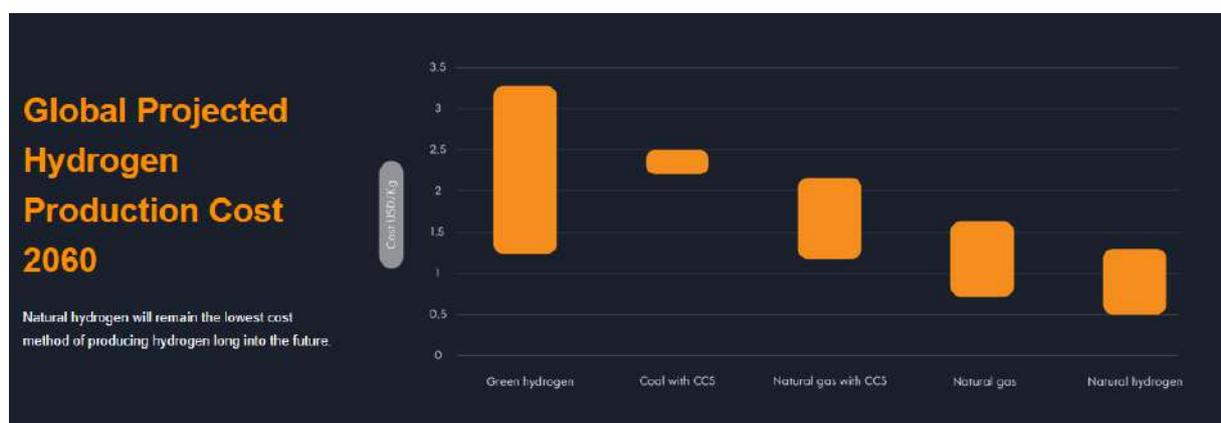
Source : note scientifique n°4098 de l'Assemblée Nationale et n° 536 au Sénat. 2022

Mais dans toutes les couleurs de l'hydrogène, il en manque une et pas des moindres: le **blanc**, qui qualifie l'hydrogène « natif » ou naturel, produit dans la nature lors de processus géologiques. Enfin nous arrivons au véritable sujet de ce module Géol Pyr, mais cette introduction un peu longue était pourtant utile, si vous ne voulez pas vous perdre dans toutes ces couleurs !

Et une nouvelle question cruciale: L'hydrogène blanc est-il plus « vert » (d'un point de vue impact environnemental) que l'hydrogène vert produit industriellement via l'électrolyse de l'eau et le plus rentable économiquement ?

C'est évident qu'une production d'hydrogène natif ne produit pas directement de CO₂, mais les forages de production, le transport ou le stockage produiront toujours indirectement du CO₂.

Par contre qu'en est-il des coûts de production ? La figure ci-dessous montre une projection à long terme qui indique que l'hydrogène blanc /natif serait la méthode de production de l'hydrogène avec le coût de production le plus bas (0.5 à 1.5 US\$/kg d'H₂), à comparer par exemple à l'hydrogène vert (1.2 à 3.2 US\$/kg H₂).



D'après le site internet de Helios Aragon (Espagne), futur producteur d'hydrogène blanc en 2025 ?

Ce coût estimé d'environ 1 US \$/kg d'H₂ reste hypothétique car, car en l'absence de production commerciale actuelle d'H₂ natif, comment le calculer ? Si ce n'est par comparaison avec d'autres sources d'énergie.

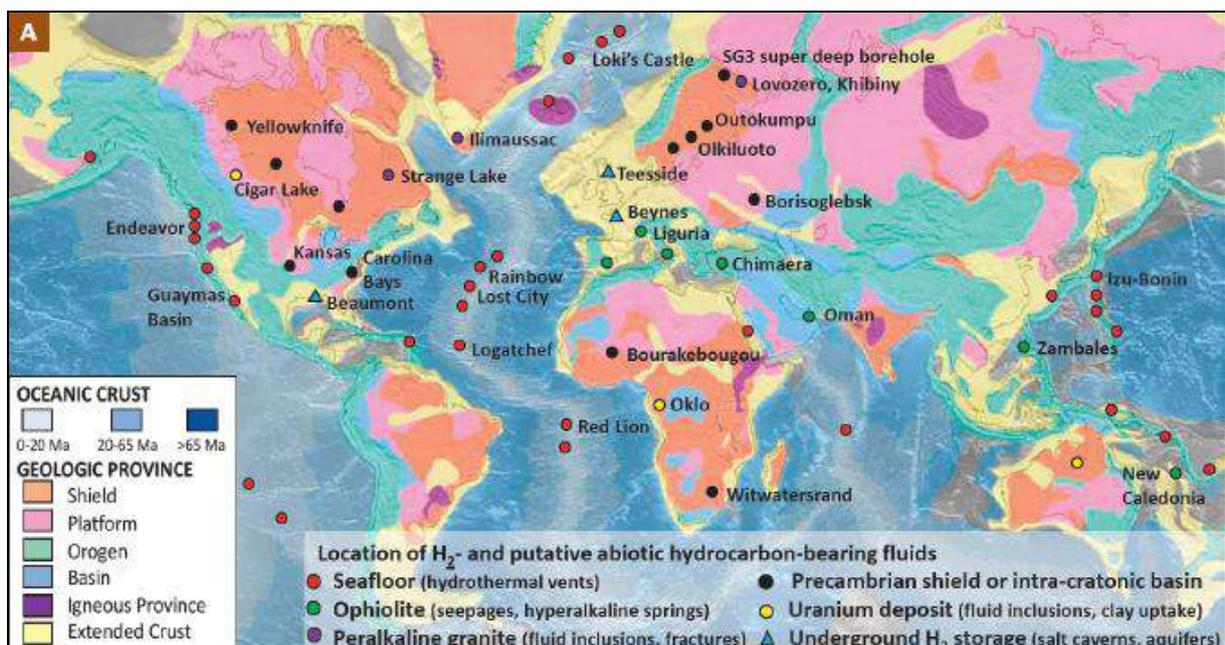
Ce chiffre de 1 US\$ /kg soulève plus de questions qu'il n'apporte de réponses. Par exemple, est-ce le coût final que le client /utilisateur payera (donc incluant le traitement et le transport) ou est-ce seulement le coût de production à la sortie du puits de production ? Et comment se compare-t-il avec les autres sources d'énergie ? Par exemple avec le coût du gaz naturel ? Il faut alors comparer les coûts par unité d'énergie (en Gigajoules). L'H₂, en termes d'énergie, correspond à 0.120 GJ/kg. Donc en supposant un coût de 1 US\$/kg, ce 1 US\$/kg correspond à 8.3 US\$/GJ. Le gaz naturel correspond en termes d'énergie à 0.95GJ/ MMBtu (Millions de British thermic units). Si on considère un coût moyen (en 2024) de 2.3 US \$ / MMBtu, le gaz naturel coûte 2.3 US\$/GJ. En conclusion, en termes d'énergie, à 1 US\$/Kg, l'H₂ natif est beaucoup plus cher que le gaz naturel (8.3 / 2.3 = 3.6 fois plus cher). On peut avoir quelques doutes sur la compétitivité de l' H₂ natif... *(D'après Laurent Truche, université de Grenoble, LinkedIn, 2025)*

Quoi attendre de l'hydrogène natif/naturel ?

Révolution ou simple évolution ? L'hydrogène naturel est une source d'énergie bas-carbone, (probablement), a priori bon marché et potentiellement bien répartie à l'échelle de la planète. On en est encore au début et de nombreuses incertitudes demeurent. Si l'hydrogène naturel est prometteur, cela ne doit pas dissuader les politiques et investisseurs de développer massivement l'hydrogène issu de renouvelables. Quels que soient les avantages de l'hydrogène naturel, on a besoin de tous les types d'hydrogène pour entamer cette transition énergétique.

3- Comment les processus géologiques génèrent de l'H₂ naturel ou natif.

Les premières découvertes d'émanations naturelles d'H₂ remontent au début du XX^{ème} siècle. Cependant, son étude n'est systématique que depuis la découverte dans les années 70 de sources hydrothermales aux fluides riches en H₂, localisées aux niveaux des rides médio-océaniques. Depuis des centaines d'émanations d'H₂ associées à des circulations de fluides hydrothermaux ont été découvertes à la fois sur le plancher océanique, mais également sur les continents, dans des contextes ophiolitiques, de bassins avant-pays ou intra-cratoniques et de zones volcaniques.



Carte géologique mondiale simplifiée, montrant la localisation de certaines occurrences d'hydrogène avec leurs origines respectives. D'après Truche et al, 2020.

Par ailleurs, les compagnies pétrolières et minières ont beaucoup de données de subsurface et, sachant que cette nouvelle ressource existait, sont allés les réexaminer. Ils ont découvert que beaucoup de puits pétroliers avaient des indices d'hydrogène : il y avait un certain pourcentage d'hydrogène dans le mélange gazeux découvert, parfois jusqu'à plusieurs dizaines de % (jusqu'à 90% en Australie). Dans la Péninsule de York, face à Adelaïde, un puits foré en 1930 avait permis de trouver un gaz contenant plus de 80 % d'hydrogène. À l'époque, ce n'est pas ce qui était recherché, donc le puits avait été rebouché. On trouve des exemples de ce type dans de nombreux endroits, même si le pourcentage d'hydrogène est rarement aussi élevé. Par exemple le puits de Monzon-1 entre Huesca et Lerida, dans la Zone Sud Pyrénéenne, qui est un ancien puits à objectif pétrolier des années 1960, recélerait jusqu'à 20 % d'H₂.

D'où vient l'hydrogène naturel ? Sur Terre, on trouve l'hydrogène dans le sous-sol terrestre et marin, essentiellement sous forme combinée - à l'oxygène dans l'eau (H₂O), au carbone (CH₄, C₂H₆, etc.), mais aussi directement sous forme gazeuse.

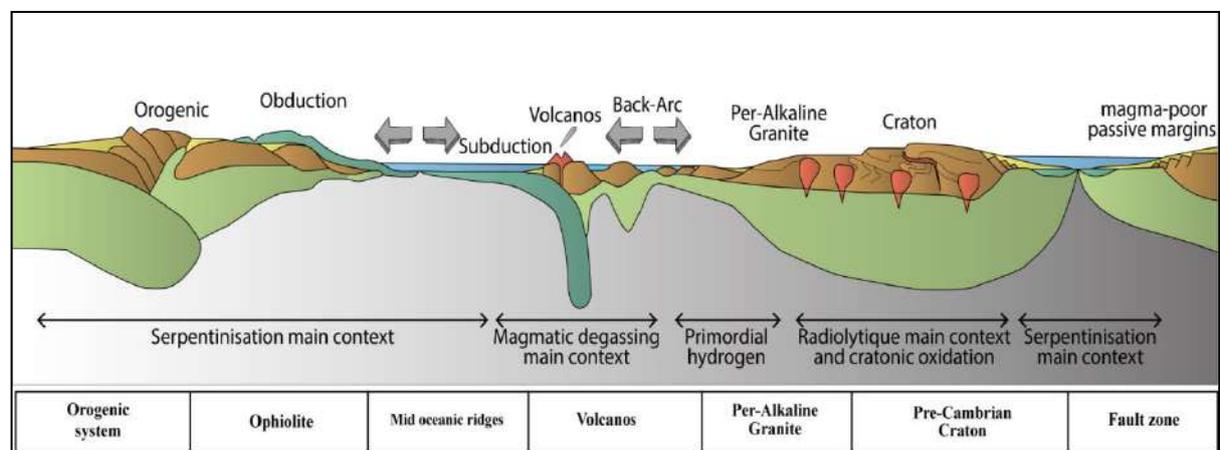
L'hydrogène naturel reste un nouveau domaine. Au fil des années, la communauté scientifique a proposé plusieurs théories sur les potentielles sources de génération de cet hydrogène, et de nouvelles hypothèses continuent à émerger sur le sujet.

Voici les principales réactions et « sources » d'hydrogène dans le sous-sol :

- la réduction de l'eau en présence de roches riches en fer (celui-ci s'oxyde). Par exemples les « banded iron formations » (formations de fer rubanées) exclusives du Protérozoïque, ou par serpentinisation des roches riches en fer du manteau (les péridotites) ou des ophiolites, par des eaux d'infiltration météoriques.
- la radiolyse par la radioactivité naturelle des roches, surtout granitiques, qui casse la molécule d'eau.
- l'écrasement des roches le long des lignes de failles, via la diffusion des molécules d'H₂ à partir des surfaces minérales fraîchement fracturées.
- Dégazage de l'hydrogène qui viendrait du centre de la croûte terrestre (généralisé lors de la formation du noyau terrestre). Hydrogène dit « primordial ».
- la maturation tardive de la matière organique, en particulier des charbons, libère aussi, au-dessus de 200°C, de l'hydrogène en profondeur, tout comme les processus industriels de gazéification du charbon.

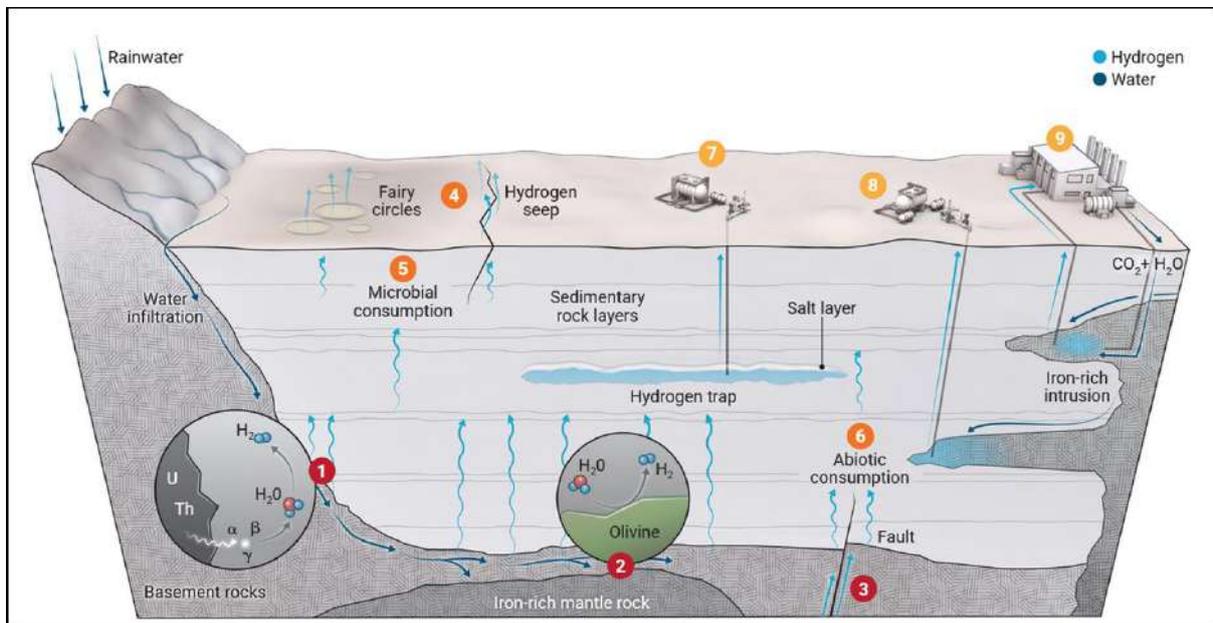


On va retrouver ces principales réactions ainsi que d'autres réactions secondaires moins fréquentes, produisant de l'hydrogène dans divers contextes géologiques qui sont résumés dans le schéma suivant :



Localisation des différents contextes géodynamiques fertiles en hydrogène. D'après N. Lefevre, thèse Grenoble, 2022.

A une échelle moindre, en milieu continental où l'exploration va se focaliser, le schéma suivant présente les différents « usines géologiques de fabrication de hydrogène » qu'on peut trouver au niveau d'un continent, dont la serpentinisation des roches riches en fer du manteau, qui nous intéresse au plus haut point, car c'est le processus qui serait actuellement à l'œuvre pour générer de l'hydrogène natif dans les Pyrénées.



Schémas illustrant les différentes potentielles « usines à hydrogène » en milieu continental. D'après l'article « Hidden Hydrogen » paru dans www.science.org, le 16 février 2023, G. Ellis USGS.

Légende (en français) du schéma ci-dessus :

Génération d'hydrogène :

1 – Radiolyse de l'eau. Les éléments radioactifs en traces dans les roches émettent des radiations qui peuvent séparer l'eau en ses 2 composants (H_2 et O_2). Le processus est lent, par conséquent les roches anciennes sont plus favorables à la génération d'hydrogène.

2- Serpentinisation. A hautes températures, les eaux d'infiltration d'origine météorique, réagissent avec les roches riches en fer (les péridotites = les « lherzolites » dans les Pyrénées) pour générer de l'hydrogène. Ces réactions, qu'on appelle la serpentinisation, sont rapides et se renouvellent en permanence et peuvent donc générer des quantités significatives d'hydrogène.

La serpentinisation et la radiolyse d'hydrogène sont les principaux processus géologiques de générer le l'hydrogène en grande quantité, donc avec un objectif commercial. **Dans les Pyrénées seule, la serpentinisation peut être envisagée et présente un intérêt.**

3-Emanation d'origine profonde d'hydrogène à partir du manteau. De l'hydrogène « primordial » pourrait être stocké dans le noyau de la Terre depuis sa formation, sous forme stable appelée « hydrures », liés à d'autres éléments. Cette forme d'hydrogène dégazerait lentement pour remonter à la surface, via les limites de plaques tectoniques ou des failles profondes. Mais cette théorie est controversée.

Mécanismes de pertes/fuites d'hydrogène

4 – Indices de surface. L'hydrogène migre rapidement (petite taille des molécules, masse spécifique légère) à travers les fractures et failles. L'hydrogène peut aussi diffuser à travers des roches relativement perméables. Ces indices de surface peuvent expliquer les petites dépressions topographiques circulaires, dépourvues de végétation, appelées « ronds de sorcières » ou « cercles de fées ».

5 – Microbes. A faible profondeur, dans les roches et les sols, les microbes consomment de l'hydrogène pour leur propre énergie, souvent produisant du méthane.

6- Réactions abiotiques. A grande profondeur, l'hydrogène réagit avec des roches pour former de l'eau, du méthane et des composés minéraux.

Extraction/production d'hydrogène

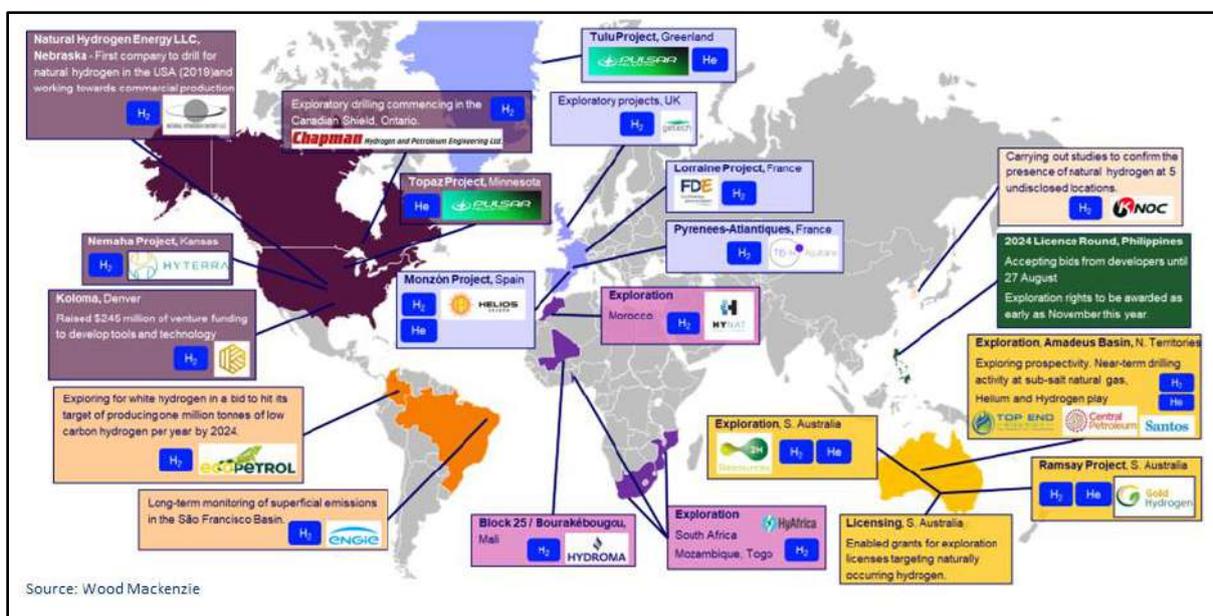
7- Pièges. L'hydrogène pourrait être piégé comme l'huile et le gaz, dans des roches réservoirs, sous des roches dites couvertures, comme des couches de sel ou d'autres roches imperméables comme les argiles.

8- Extraction directe. Il pourrait être possible d'extraire directement l'hydrogène à partir de roches riches en fer, si ces dernières sont relativement peu profondes (= atteignables par forage) et suffisamment fracturées (avec l'aide de la fracturation hydraulique, très controversée ?) pour que l'hydrogène soit collecté (par exemple, cas d'hydrogène dans les couches de minerais de fer d'anciennes mines de fer).

9- Production assistée. La production d'hydrogène pourrait être stimulée par pompage d'eau dans les roches riches en fer. Il serait aussi possible d'injecter du CO₂ pour le séquestrer en profondeur.

L'exploration s'accélère dans de nombreux pays

Depuis quelques années, on assiste à travers le monde au démarrage de l'exploration pour l'hydrogène natif. Certains (optimistes ?) envisagent même que ce type d'exploration va prendre le relais de l'exploration pétrolière. A noter que les acteurs sont souvent de petites sociétés spécialisées dans l'hydrogène et/ou l'hélium ; les majors pétroliers, même s'ils suivent attentivement ce sujet, ne sont pas (encore ?) impliqués dans l'exploration de l'hydrogène natif. C'est en Australie du sud, mais surtout aux USA (Nebraska, Arizona, Nouveau Mexique, Kansas, Midwest) que l'exploration de l'hydrogène avance le plus rapidement et est parfois déjà arrivée au stade des forages de reconnaissance. Mais ailleurs, de très nombreux pays sont désormais entrés dans la course, comme l'indique la carte ci-dessous.



Projets et activités d'exploration pour l'exploration de l'H₂ et de l'He. Source : Wood MacKensie, 2024

4- Le système hydrogène : de la source d'hydrogène à partir des roches ultra-mafiques du manteau, aux fuites d'hydrogène en surface

Il convient de tirer des leçons utiles des connaissances du système pétrolier. Pour commencer à évaluer le potentiel des accumulations d'hydrogène natif, les géologues ont besoin d'un meilleur modèle géologique pour comprendre comment l'hydrogène se forme, d'où il provient, dans quelles formations géologiques il est généré, et finalement où il termine sa migration et s'accumule éventuellement dans des gisements commerciaux. Grâce à l'expérience acquise dans ce domaine par les explorateurs pétroliers, pour l'exploration de l'hydrogène, nous sommes avantagés car on ne démarre pas de zéro. En s'appuyant sur ce socle de connaissances de la géologie pétrolière, il est possible d'établir un modèle pour l'hydrogène, qui utilise l'approche du système pétrolier. C'est ce que nous allons essayer de réaliser dans les prochains chapitres.

4-1 Rappel : le « système pétrolier »

Rappelons succinctement ce qu'est un système pétrolier avant d'essayer de définir un système analogue, mais appliqué à l'hydrogène.

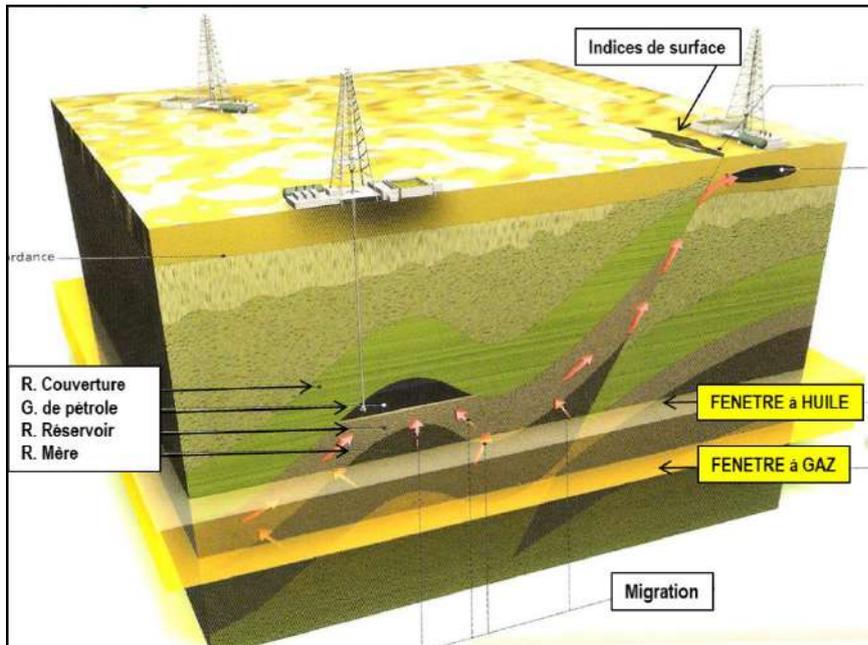
Le système pétrolier est un modèle conceptuel élaboré pour mieux comprendre la présence de gisements pétroliers (huile ou gaz naturel /méthane) dans les bassins sédimentaires. Il est utilisé par les géologues pétroliers depuis des décennies pour guider efficacement l'exploration pour l'huile et le gaz afin de réaliser des évaluations précises des ressources pétrolières non encore découvertes.

Ce modèle du système pétrolier aide les géologues à analyser tous les facteurs et paramètres qui doivent impérativement fonctionner ensemble et surtout au bon moment, pour arriver à la formation d'une accumulation de pétrole ou de gaz ou des deux.

Imaginez un géologue, qui à l'image d'une enquête policière, suit et rassemble des indices pour résoudre un puzzle ou une énigme.

- Premièrement il faut identifier une roche dite « roche-mère » (ou « source-rock » appellation mieux adaptée en anglais) qui est une roche sédimentaire qui doit contenir de la matière organique (= le kérogène d'origine marine, lacustre ou terrestre) qui a été préservée (c'est-à-dire non détruite par l'oxydation au moment du dépôt). Cette roche mère en profondeur, à partir d'une certaine température, atteint un seuil de maturité qui va permettre la génération et l'expulsion des hydrocarbures (= fenêtres à huile et à gaz). Il faut aussi déterminer pendant quelle période de temps (en Ma) cette expulsion des hydrocarbures se produit avant que le potentiel pétrologène de la roche mère ne soit complètement épuisé.
- Ensuite, le géologue doit identifier les chemins de migration de ces hydrocarbures vers la surface à travers des diverses roches poreuses et perméables ou via des failles.
- Il doit aussi caractériser les « roches réservoirs » où pourront s'accumuler les hydrocarbures à la faveur de structures qui piègent ces hydrocarbures (= pièges structuraux, stratigraphiques ou mixtes). Il faudra aussi une roche couverture qui empêchera que ces hydrocarbures s'échappent du piège, pour arriver en surface (= indices de surface).
- Il faut que cette roche couverture soit efficace, parfois pendant des millions d'années. Et que les hydrocarbures piégés soient préservés, par exemple en n'étant pas soumis à la biodégradation par des bactéries.
- Il faut aussi que les hydrocarbures possèdent des caractéristiques physiques et chimiques pour être exploités commercialement (densité, viscosité). Le volume du gisement à des profondeurs atteignables par forage doit aussi être évalué pour savoir s'il passe le seuil économique.

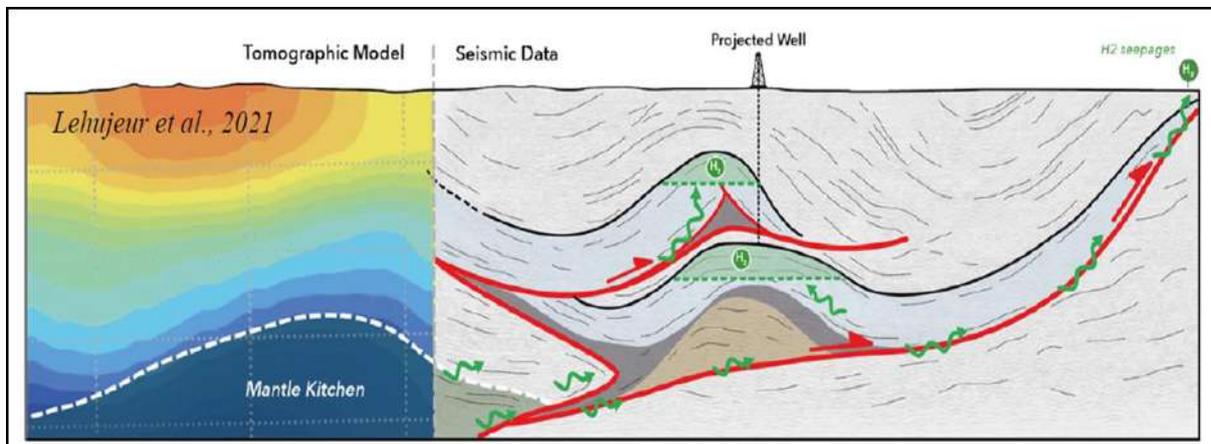
Il suffit qu'un de ces composants soit absent ou ne fonctionne pas au bon moment, pour que tout le système pétrolier s'effondre, ce qui aura comme conséquence qu'on ne découvrira pas de gisement pétrolier ! Le système pétrolier se nomme par sa roche mère, puis par son (ou ses réservoirs) ce qui suppose que l'on a tout compris et intégré; il pourrait en être de même pour le système hydrogène.



Bloc diagramme en 3D, représentatif d'un système pétrolier classique, mettant en jeu les éléments suivants, roche-mère, roches réservoirs, roches couvertures et pièges et les processus suivants, génération des hydrocarbures, migration, accumulation et préservation. D'après document AAPG.

4-2 Le système hydrogène : de la source d' H_2 en profondeur à la fuite en surface.

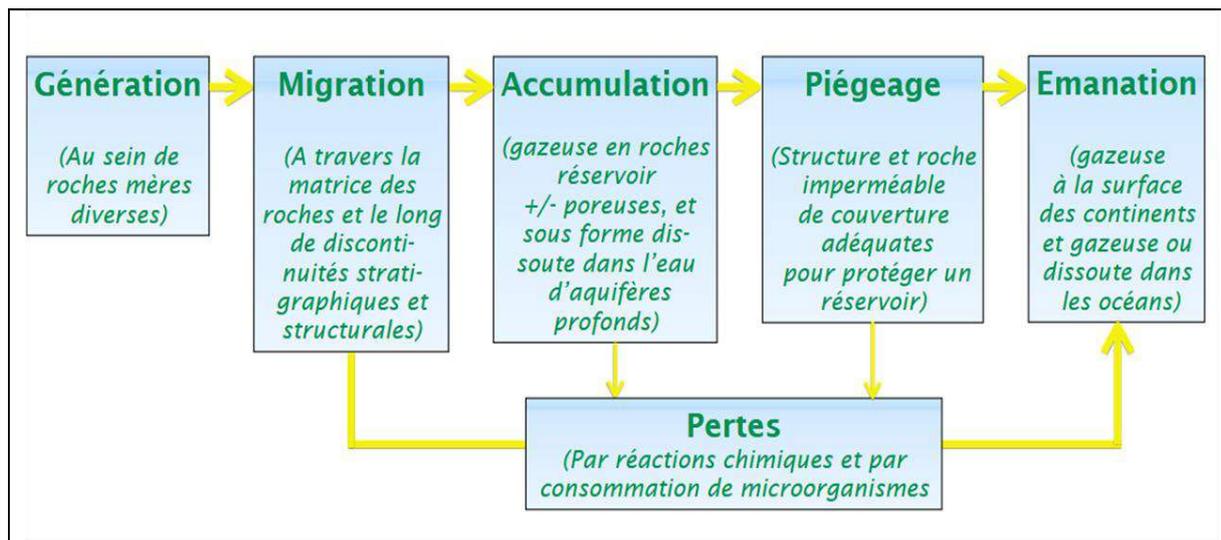
Il serait dommage de ne pas apprendre des expériences et leçons du système pétrolier pour l'exploration de l'hydrogène natif. On va retrouver tous les éléments (roche-source, réservoir, couverture, piège) et les processus (génération, migration, accumulation, préservation) mais avec des variantes spécifiques à ce nouveau système hydrogène.



Coupe schématique basée sur un cas réel (Pyrénées) illustrant le système hydrogène. Dans ce cas présent, la source d'hydrogène (= « mantle kitchen ») est constitué des roches du manteau en voie de serpentinisation. L' H_2 migre à travers des failles profondes et roches poreuses et perméables vers la surface. Si aucun piège ne vient arrêter la migration, l'hydrogène arrivera en surface et créera des indices de surfaces, par exemples de « ronds de sorcières ». Si l' H_2 prend des chemins de migration différents et plus compliqués, il peut alors se retrouver piéger dans des structures anticlinales qui doivent comporter une roche réservoir (pour stocker le volume d' H_2) et une roche couverture pour empêcher l' H_2 de s'échapper du piège. D'après Lejuheur et al, 2021.

Pour adapter le modèle du système pétrolier, pour les accumulations d'hydrogène, les géologues doivent comprendre comment l'hydrogène naturel se forme à partir de certaines roches-sources, quels types de processus naturels peuvent affecter cet hydrogène naturel une fois formé, et

comment l'hydrogène peut être piégé dans certaines roches réservoirs couvertes par des roches couvertures étanches, lors de son cheminement vers la surface.



Eléments et processus du système hydrogène. On retrouve quasiment toutes les rubriques du système pétrolier. Cependant le système Hydrogène, par rapport au système pétrolier, comporte des spécificités qui lui sont propres, par exemple une grande variété de roches sources/mères, des conditions de génération (température) différentes, la nécessité de roches couvertures plus efficaces que pour l'huile (à cause des caractéristiques de la molécule H_2), des modalités d'altération différentes entre l'hydrogène et une huile. Extrait de la présentation de Ph. Dubreuilh à la CPIE littoral basque, 2022.

Passons donc en revue ces éléments et processus définissant le système hydrogène.

4-2-1 Les roches-sources

Par rapport au système pétrolier où la roche source ou roche mère, est généralement une roche sédimentaire argileuse ou marneuse contenant de la matière organique, les roches sources pour l'hydrogène seront de nature plus variées. Les géologues savent déjà qu'il y a au moins une douzaine de processus qui génèrent de l'hydrogène, mais évaluer les potentielles ressources en hydrogène nécessite d'identifier les processus capables de générer de grandes quantités d'hydrogène. Un de ces processus prolifiques sur lequel les scientifiques s'accordent c'est l'interaction des eaux souterraines avec des minéraux riches en Fer comme le péridot, surtout l'olivine, qui composent les roches ultra-mafiques, par exemple du manteau ou des ophiolites, c'est-à-dire des reliquats de roches volcaniques du plancher océanique, reprises dans un orogène. Ce processus s'appelle la serpentinisation.

Pour que la serpentinisation se déclenche il faut de l'eau et pour que cette serpentinisation se poursuive pour produire des volumes significatifs d'hydrogène, il faut donc une alimentation continue en eau.

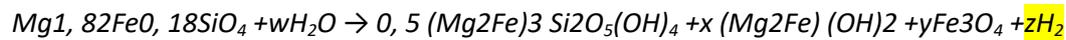
La serpentinisation : quelques rappels de chimie minérale

Extrait de la thèse de Nicolas Lefeuvre, pages 17 à 19 ; pour plus de détails consulter cette thèse, voir la rubrique « pour aller plus loin » à la fin de ce module.

La serpentinisation est une réaction d'altération eau-roche, durant laquelle les roches ultra mafiques sont oxydées par l'eau en serpentine et produisent de l' H_2 naturel. Ce type de roches est le principal constituant du manteau terrestre ce qui explique l'intérêt tout particulier de la communauté scientifique pour cette réaction.

Les roches ultra-mafiques, dont le représentant le plus commun est la péridotite (avec l'appellation locale de lherzolite dans les Pyrénées) sont constituées essentiellement d'olivine et de pyroxène, tous deux instables dans des conditions hydrothermales. L'olivine (Fe, Mg) $2SiO_4$ est une solution solide

entre deux pôles purs à savoir la forstérite (Mg_2SiO_4) et la fayalite (Fe_2SiO_4). L'altération de l'olivine en condition anoxique (en l'absence de dioxygène, O_2) hydrothermale est couplée à l'oxydation du fer ferreux (Fe^{2+}) contenu dans cette dernière en fer ferrique (Fe^{3+}). Cette réaction engendre la formation de minéraux secondaires comme la serpentine, la magnétite et la brucite, mais produit également de l'hydrogène par réduction de l'eau (formule chimique Mc Collom & Donaldson, 2016).



Les coefficients w , x , y et z dépendent de la façon dont le fer est distribué dans les produits de réaction (serpentine et magnétite). Au cours de la réaction, l'incorporation du Fe^{2+} dans la serpentine contribue à plus de 30 % de l' H_2 total produit, tandis que les 70 % restant sont liés à la cristallisation de la magnétite, un oxyde de fer mixte Fe^{2+}/Fe^{3+}

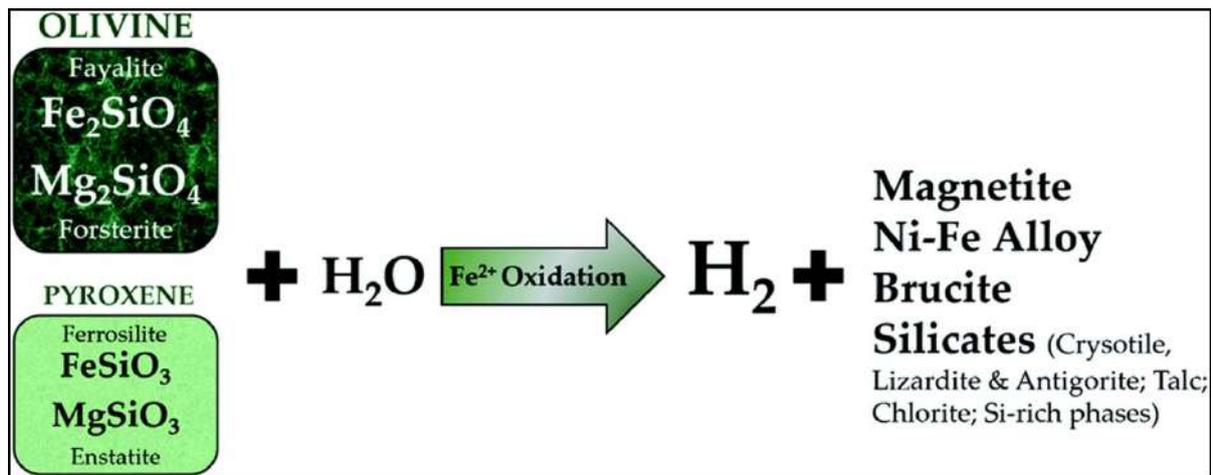


Schéma illustrant la réaction de serpentinisation de l'olivine et du pyroxène, produisant de l'hydrogène et divers silicates. D'après NG. Holmet al, Astrobiology, 2014.

Conditions de température

La présence de serpentinite riche en magnétite indique une serpentinisation à haute température ainsi que des conditions réductrices. La vitesse de réaction semble également être plus élevée dans les gammes de températures allant de 200 à 310°C.

La serpentinisation peut également avoir lieu à plus basse température mais avec des vitesses de réaction beaucoup plus lentes.

La génération d' H_2 observée à basse température est fortement liée à la composition de l'olivine et à la cristallisation de la serpentine qui incorpore largement le fer; à la différence de la serpentinisation haute température ($T > 150^\circ C$) induisant une formation de magnétite, on observe à basse température ($T < 150^\circ C$) la formation de minéraux intermédiaires telle que la brucite. La diminution de la quantité de magnétite présente dans la serpentinite, se traduit par une diminution de la susceptibilité magnétique des roches altérées.

Remarques : Ces observations peuvent être exploitées en exploration par magnétométrie pour sélectionner les zones magnétiques dans le corps de serpentine, à priori plus favorables à la génération d' H_2 . De même, au sein du corps de serpentine des zones à température élevée seraient plus favorables.

Augmentation de volume des péridotites lors de leur serpentinisation

L'altération hydrothermale des péridotites en serpentinite devrait induire une diminution de la perméabilité de la roche réduisant d'autant l'arrivée d'eau nécessaire à la réaction et donc la production d'H₂ associée. Cependant de récentes études ont également montré que la formation de la serpentine provoque une augmentation du volume solide de 25 à 53 % se traduisant par la création de micro fissures. Ces dernières permettent aux fluides hydrothermaux, dont l'H₂ produit, de circuler dans les péridotites.

Remarque : Donc l'altération hydrothermale des péridotites, contrairement à ce qu'on pourrait penser (réduction de la perméabilité) est plutôt un facteur favorable à la circulation des fluides via des microfissures induites, au sein des péridotites, ce qui entretient le processus de génération de l'H₂

De nombreuses occurrences d'H₂ liées à la réaction de serpentinisation ont été découvertes dans des contextes de roches ultra-mafiques, proches de sites hydrothermaux au niveau des dorsales océaniques, ainsi que dans des contextes ophiolitiques associés à des sources d'eau hyperalcalines (par exemple Oman, Ligurie en Italie, Zambales au Philippines, Chimaera en Turquie, Ronda en Espagne).

Texte Extrait de la thèse de N. Lefevre, Grenoble, 2022

Comme vous pouvez vous en rendre compte par vous même à la lecture de ce chapitre sur la serpentinisation, les roches ultra-mafiques, roches-sources dans le système Hydrogène, c'est plus compliqué que la roche mère dans le système pétrolier ! La nature de la roche source est évidemment à prendre compte dans le contexte de serpentinisation, mais aussi la fenêtre de température qui peut faciliter cette serpentinisation, la nécessité d'avoir des apports d'eau en continu pour entretenir cette serpentinisation et la nécessité de favoriser les circulations d'eau au sein du corps de péridotites par des microfissures justement induites par l'altération hydrothermale des péridotites.

4 -2-2 Migration de l'hydrogène à partir de la roche source vers la surface ou les pièges

Identifier les chemins de migration de l'hydrogène, à partir de la roche source, à travers diverses formations poreuses et perméables ou à la faveur de failles ou de discontinuités stratigraphiques, vers les pièges potentiels ou jusqu'aux indices de surface, est un exercice difficile avec beaucoup d'incertitudes et de risques, et similaire à celui du système pétrolier.

Mais le système hydrogène comporte quelques spécificités supplémentaires. En effet une fois l'hydrogène formé, plusieurs processus chimico-biologiques peuvent « consommer » cet hydrogène au cours de sa migration vers les pièges, ou la surface, ou au sein des pièges. Les réactions chimiques de l'hydrogène sont favorisées à des températures supérieures à 200 °C avec des minéraux, l'oxygène, le CO₂, le méthane, et autres hydrocarbures. L'hydrogène peut aussi être consommé par des bactéries à des températures inférieures à 100 °C et plus proche de la surface. Ces consommations ont été mesurées à plusieurs dizaines de % du contenu initial en hydrogène.

En particulier, de nombreuses bactéries et autres micro-organismes peuvent vivre dans l'hydrogène et les microbiologistes ont maintenant décrit une « biosphère » profonde alimentée par l'hydrogène.

Sous quelle forme l'hydrogène migre-t-il ? A priori sous forme dissoute dans l'eau (circulation d'eaux plus ou moins hydrothermales) en profondeur, mais en atteignant une faible profondeur (pressions et températures plus basses) l'hydrogène est de moins en moins soluble dans l'eau et commence à dégazer. La migration du gaz hydrogène (la plus petite et la plus légère des molécules de gaz) peut se faire à travers la matrice des roches plus ou moins réservoirs (même avec des porosités et

perméabilités très faibles), le long de discontinuités stratigraphiques (par exemple des discordances) ou via un réseau de fractures ou de failles ouvertes.

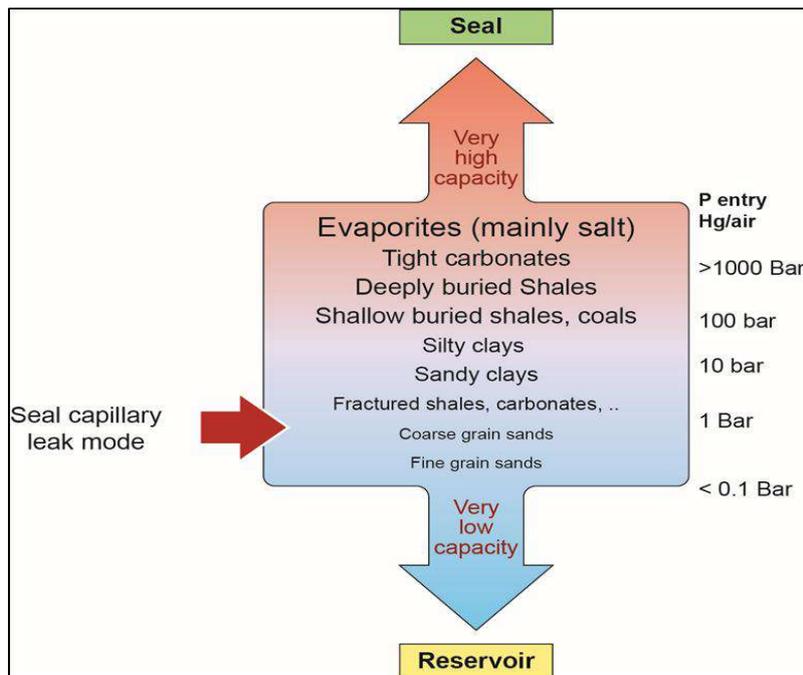
4-2-3 Roches réservoirs

A priori, les roches réservoirs sont similaires dans le système pétrolier ou le système hydrogène : des roches très majoritairement sédimentaires comportant une porosité (pour stocker le volume d'hydrogène ou de pétrole ou de gaz) et une perméabilité (pour que les fluides puissent se déplacer et être extraits du réservoir). Cependant les différences des caractéristiques entre hydrogène et pétrole/gaz naturel (taille des molécules par exemple) ont probablement un impact sur les seuils de porosité et de perméabilité.

4-2-4 Roches couvertures

Pour qu'une accumulation, que ce soit d'hydrocarbures ou d'hydrogène, soit préservée dans un piège, il faut qu'il y ait au-dessus, une roche couverture efficace (ou latéralement des failles étanches); mais à cause de la différence de la taille entre des molécules de l'hydrogène ou du méthane, l'efficacité de la couverture risque d'être différente. Pendant des décennies, les géoscientistes ont pensé que les couvertures classiques du système pétrolier ne pouvaient pas retenir des accumulations d'hydrogène, parce que la petite taille des molécules d'hydrogène ferait que l'hydrogène s'échapperait à travers les roches, mêmes les plus compactes et imperméables. Cependant, les études ont montré que le diamètre d'une molécule H₂ est à peu près égal à celle d'un seul atome d'hélium et par conséquent que ces deux gaz peuvent être piégés par des roches couvertures similaires. Des accumulations d'hélium sont connues qui ont été préservées dans leur piège depuis 100 Ma ; donc il est raisonnable de penser que l'hydrogène pourrait être piégé pendant des durées de temps similaires, prouvant l'efficacité des couvertures impliquées dans le piégeage.

Sous une couverture la rétention d'un fluide (huile, gaz naturel, hydrogène) se fait sur deux modes physiques : l'intégrité de la roche couverture régie par la résistance à la fracturation hydraulique et la capacité régie par la pression d'entrée capillaire, qui valent aussi pour les réservoirs. Les forces capillaires devraient assurer une étanchéité à l'hydrogène, à condition que la pression de stockage reste inférieure à la pression d'entrée capillaire. L'hydrogène présente des pressions capillaires d'entrées plus élevées que le gaz naturel par exemple en raison de la tension interfaciale plus élevée de l'hydrogène, ce qui est plutôt encourageant par rapport aux hydrocarbures pour la rétention.



Quelques chiffres de référence de pression capillaire d'entrée dans une roche couverture (en bars). Pour une couverture efficace dans le système hydrogène, les évaporites présentent les meilleures caractéristiques. D'après JJ Biteau, From basin to prospect evaluation, UNAM, 2024.

Les roches couvertures classiques du système pétrolier sont à priori aussi candidates pour le système hydrogène, mais avec probablement des caractéristiques d'étanchéité/imperméabilité renforcées pour l'hydrogène, compte tenu de la taille et de la légèreté des molécules d'hydrogène.

Parmi les roches couvertures les plus efficaces, on retrouvera donc les niveaux d'évaporites et les niveaux d'argiles saturées en eau. Est-ce que les calcaires (« tight carbonates ») ou grès cimentés très compacts qui sont parfois des roches couvertures pour les hydrocarbures, sont-elles aussi imperméables pour l'hydrogène ? Le gisement d'hydrogène du Mali comporte des roches couvertures originales et peu fréquentes : des dolérites (roches volcaniques intrusives en dykes, cf. chapitre suivant) mais à faible profondeur, donc avec des pressions faibles.

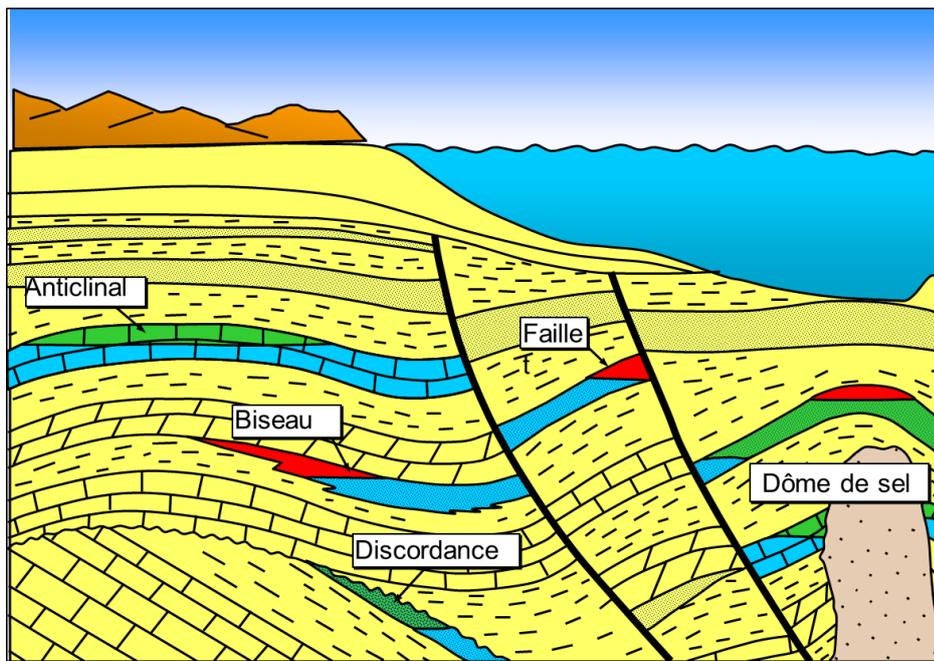
4-2-5 Les pièges

A priori les pièges (piège= structure géologique impliquant un réservoir et sa couverture) pour l'hydrogène seraient similaires à ceux du système pétrolier. Voir le schéma ci-dessous.

Cependant il faut apporter quelques nuances importantes. L'hydrogène peut se dissoudre dans l'eau et donc s'accumuler dans les eaux des aquifères profonds sans forcément avoir besoin de pièges comme le conçoivent les pétroliers. L'hydrogène dans les aquifères profonds est plus soluble dans les eaux, si la pression et la température augmentent, mais par contre il y a un effet négatif de la salinité des eaux. Ce phénomène a été observé dans des forages de géothermie profonde.

Il faudrait produire l'eau à partir de forages, puis récupérer l'hydrogène par dégazage en surface, mais aussi valoriser la température de l'eau par géothermie, avec une covalorisation hydrogène et géothermie.

Plus classiquement, l'hydrogène sous forme gazeuse pourrait s'accumuler dans des roches réservoirs plus ou moins poreuses et être piégé dans des structures géologiques comportant une roche imperméable formant une couverture adéquate et efficace contre la dissipation de l'hydrogène vers la surface.



Coupe géologique schématique illustrant les principaux types de pièges pétroliers. Pièges structuraux: anticlinal, contact contre faille et anticlinal faillé. Pièges stratigraphiques: biseau stratigraphique, piège associé à une discordance et piège mixte structural et stratigraphique. Piège associé à un dôme de sel : anticlinal formé à l'aplomb du dôme, ou piège contre le dôme de sel. Rouge = gaz, vert = huile. D'après AAPG.

4-2-6 Une spécificité originale du système hydrogène : un flux actuel continu de l'hydrogène

Certaines accumulations d'hydrogène se rempliraient actuellement et de ce fait pourraient être considérées comme « renouvelables », compte tenu de la génération rapide et actuelle de l'hydrogène par la réduction par l'eau de roches sources riches en fer. Ce qui en fait en grande différence avec le système pétrolier: la dynamique temporelle est différente entre hydrocarbures (on parle en Millions d'années) et l'hydrogène (on parle de l'actuel et génération encore en cours).

Il faut avoir une vision dynamique des flux d'hydrogène entre les débits de génération/ production, de migration et la capacité des accumulations « transitoires » : c'est un peu comme la région des Grands Lacs aux Etats-Unis, qui constitue une succession d'accumulations (les lacs), tous interconnectés et dont le chemin de migration final est le fleuve Saint-Laurent. Il faut s'imaginer un tel système dans le sous-sol, mais avec de l'hydrogène gazeux et non pas de l'eau, en 3D et à beaucoup plus petite échelle bien sûr !

Certains chercheurs suggèrent que les réservoirs, les pièges et les couvertures ne sont éventuellement pas nécessaires pour produire de l'hydrogène. Il suffirait de capter directement le flux d'hydrogène, soit à la source, soit le long des chemins de migration, mais à condition que le flux d'hydrogène soit relativement important pour satisfaire une exploitation commerciale. Ce serait une différence spectaculaire par rapport au système pétrolier où l'on recherche des gisements d'hydrocarbures fossiles et anciens préservés jusqu'à nos jours. D'autres voudraient capter directement les émissions en surface au niveau des « ronds de sorcières », mais comment faire de façon rentable ?

D'autres scientifiques vont encore plus loin, en proposant d'injecter de l'eau chaude dans des formations riches en fer (mais atteignables par forage), qui actuellement ne produisent pas d'hydrogène, mais qui pourrait en produire par stimulation, un peu à l'image de la géothermie stimulée (forages d'injection et forage de récupération) créant ainsi un système hydrogène artificiel !

4-2-7 Les indices de surfaces : les « ronds de sorcières » ou « cercles de fées »

Remarque : nous insisterons sur ce chapitre, car pour un géologue, l'explication de ces ronds de sorcières en tant qu'émanation d'H₂ en surface est un phénomène relativement nouveau (quelques années seulement) et innovant avec une répartition mondiale plutôt inattendue.

Au début de l'histoire pétrolière, les explorateurs ont commencé à forer à proximité des indices d'huile de surface, connues à travers le monde. Les concepts de système pétrolier et de théorie de l'anticlinal en tant que piège pétrolier, n'étaient pas encore élaborés.

Que ce soit dans le système pétrolier ou d'hydrogène, des indices de surfaces prouvent dans les deux cas, qu'un système pétrolier ou hydrogène est à l'œuvre en profondeur au moins avec une roche source et une migration jusqu'en surface, mais sans garantie que des pièges et gisements commerciaux existent !

Les indices d'huile, même fortement biodégradées, sont facilement repérables en surface, mais c'est moins évident avec l'hydrogène qui se disperse rapidement dans l'atmosphère, sans trop laisser de trace (sauf s'il est enflammé), sauf en présence de « ronds de sorcières » (ou plus poétiquement les « cercles de fées », au choix). A ne pas confondre avec les ronds de champignons ...

Les ronds de sorcières sont des formations circulaires (quelques mètres à centaines de mètres de diamètre, voire plus d'un km) correspondant à une légère dépression topographique, avec une végétation inexistante ou appauvrie et une périphérie au contraire avec une augmentation de la végétation. Ces formations sont observées dans beaucoup d'endroits au monde, notamment en Russie, Brésil, Canada, USA, Namibie, Australie, Mali, etc ... et même en France ! En 2023, une étude mondiale a été lancée à partir de photos satellites avec l'aide l'IA, à qui on a appris à détecter ces ronds de sorcières. Au final, ces ronds de sorcières ont été détectés dans 15 pays différents, et sont surtout visibles dans des zones arides ou de prairie, mais pas que (ex Sibérie) où la détection par photos satellites est plus difficile.

Pour un tour de la terre à la recherche des ronds de sorcières, cliquez [ICI](#) . Dommage, il manque le survol des Amériques.

Vues du ciel, ces taches sont organisées en motifs relativement réguliers ne pouvant pas être dus au hasard, parfois selon des lignes rectilignes (qui correspondraient à des failles arrivant en surface ?). De nombreuses hypothèses ont été avancées parfois saugrenues, puis réfutées pour expliquer ces curiosités naturelles : pluies de météorites, radioactivité, sols toxiques, présence de termites, auto-organisation de l'écosystème etc. Il s'avère que beaucoup de ces ronds de sorcières correspondent à des émanations d'hydrogène qui sont passées longtemps inaperçues. La multiplication de ces ronds de sorcières à travers le monde indiquerait que les émanations d'hydrogène sont plus fréquentes qu'on le pensait initialement, et que des systèmes hydrogène seraient en action dans beaucoup de pays.

Exemples de ronds de sorcières à travers le monde

- Namibie

Personnellement dans les années 70, en faisant de la prospection uranium dans ce fascinant pays, j'avais observé cette curiosité dans divers endroits de la Namibie, sans avoir une explication satisfaisante. 50 ans après enfin une explication plausible et rationnelle avec des émanations d'hydrogène !

Environ 300 ronds de sorcières sur une surface de 180 km² ont été observés et étudiés dans la région de Mariental dans le SE de la Namibie. Pour plus détails consulter la publication d'Isabelle Moretti et al, 2022 dans la rubrique en fin de module « pour aller plus loin »



Photos de ronds de sorcières, prise à partir d'une montgolfière, dans le désert du Namib. La piste et le véhicule donne l'échelle. A noter que la taille de ces structures est relativement homogène et qu'elles sont réparties sans aucune direction préférentielle.

Attention ces ronds de sorcières de taille restreinte (diamètre d'environ deux fois la longueur du véhicule sur la photo) ne seraient pas dus à des émanation d' H_2 (aucun indice d' H_2 détecté) mais à l'activité de termites. Photo Brian Scantlebury.

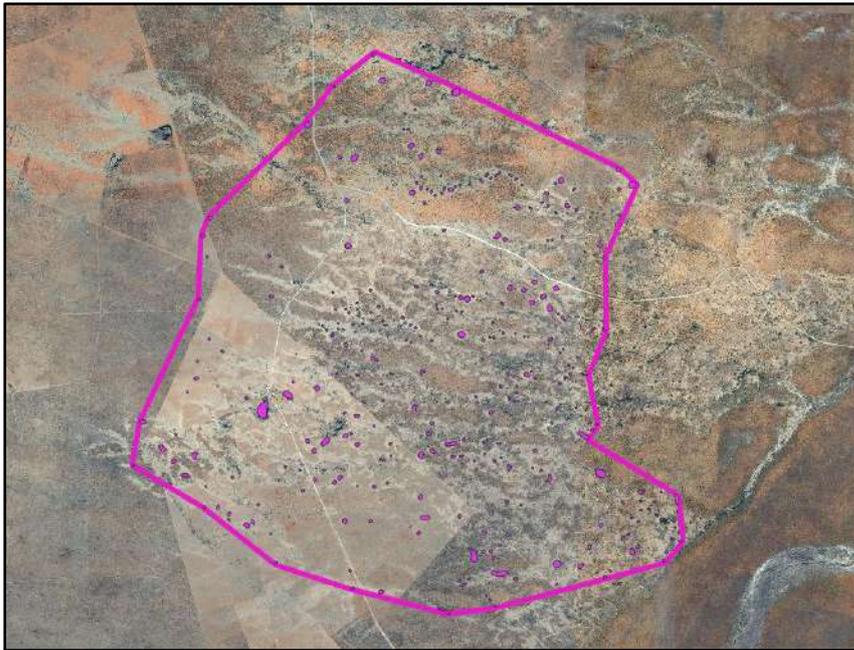
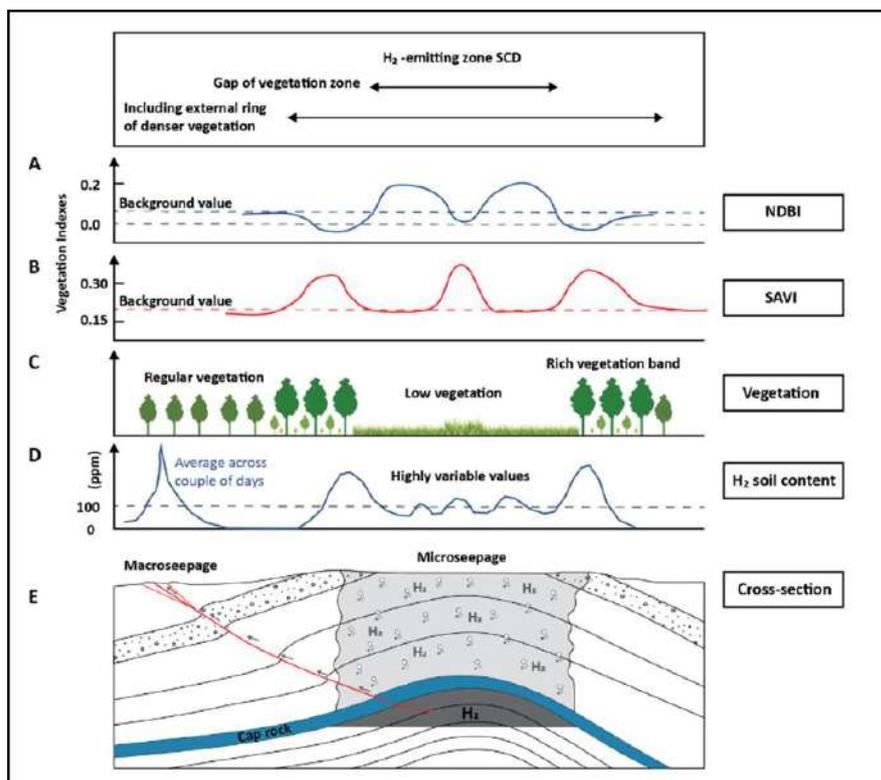


Photo satellite de la région d'Okakara dans le centre-est de la Namibie, montrant de nombreux ronds de sorcières correspondant à des émanations d' H_2 natif. D'après I. Moretti et al 2022.



Exemple d'une coupe à travers un rond de sorcière en Namibie. Avec profil de la végétation et teneur en H₂ des indices de surface. A noter que les émanations d'hydrogène se produisent surtout à la périphérie et non au centre de la structure. A noter aussi une émanation latérale à la structure due à une faille en relation probable avec la source d'hydrogène (roches précambriennes riches en fer). Ces émanations sont variables dans le temps (sur plusieurs jours) et aussi au cours d'une journée. D'après I. Moretti et al 2022.

Exemples de ronds de sorcière au Brésil

670 structures en ronds de sorcières ont été identifiées dans le bassin de São Francisco au Brésil, où affleurent des formations d'âge protérozoïque en surface.

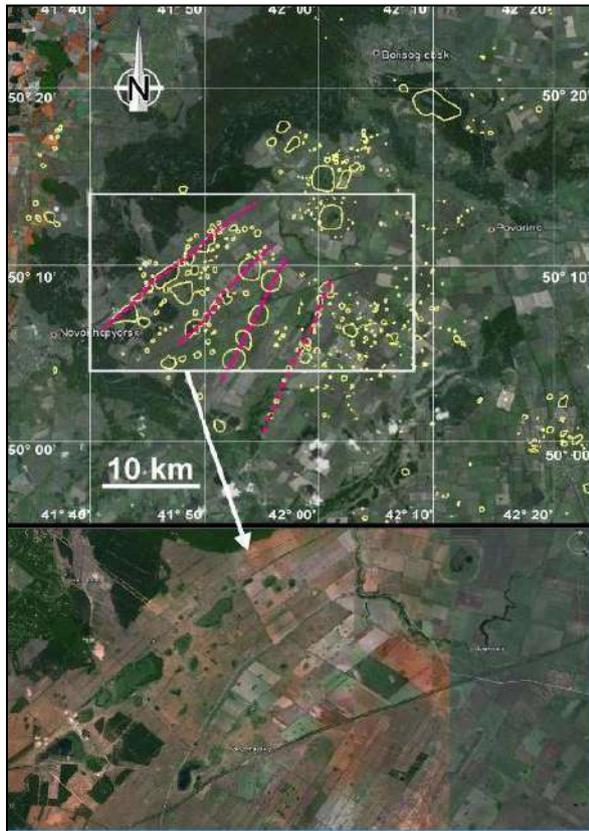
Une surveillance de longue durée sur 8 mois, avec plusieurs dizaines de capteurs, a été réalisée sur deux ronds de sorcières voisins d'environ 500 m de diamètre. Il été démontré que ces émanations sont très fluctuantes dans le temps et périodiques avec un pic journalier, pas toujours continu sur 24 heures, avec des pulsations sporadiques importantes. Au point de vue flux d'hydrogène, le record des émissions est de 7 000 m³ à 178 000 m³ d'H₂ par jour.



Un grand rond de sorcière, d'environ 400 m de diamètre sans végétation, correspondant à de émanations d'hydrogène, dans le Minas Gerais, au Brésil. Photo A. Prinzhofer.

Exemples de ronds de sorcières en Russie

Dans la partie russe du craton européen, plusieurs milliers des structures circulaires de ronds de sorcières ont été identifiées entre Moscou et le Kazakhstan (dont 540 au SE de Moscou) avec des diamètres variant de 100 m à plusieurs km. Ces ronds de sorcières apparaissent en contexte de socle granitique avec une couverture sédimentaire. A l'intérieur et à la périphérie de ces structures, des anomalies d'hydrogène dans les sols atteignent jusqu'à 1.25 %. L'hydrogène est associé avec de faibles quantités de méthane. Des estimations de flux d'hydrogène s'échappant des ces structures ont été réalisées : entre 21 000 à 27 000 m³/jour pour une de ces structures.



Ronds de sorcières à Borisoglebsk, 600 km au sud de Moscou. D'après Prinzhofer et Deville, *H₂ naturel la prochaine révolution énergétique*, 2010, repris par Ph. Dubreuil, 2023

Exemples de ronds de sorcières en Australie



Photo satellite Landsat, 2023, près de la ville de Moora en Australie, montrant plusieurs ronds de sorcières. D'après Euractiv, *the trust project*, 202

Exemples de ronds de sorcières aux USA (Caroline du Nord)

Des dizaines de ronds de sorcières ont été détectés sur la côte atlantique de la Caroline du Nord. Des flux d'hydrogène jusqu'à 2700 m³/jour ont été mesurés dans ces ronds de sorcières.

C'est une première mondiale, un forage a été entrepris au centre d'un de ces ronds de sorcière.

L'idée, plutôt originale, voir saugrenue ? est qu'un rond de sorcière correspondrait à l'émanation en surface d'un conduit de dégazage (« plume ») en provenance d'H₂ dit « primordial » d'origine très profonde, donc rien à voir avec la serpentinisation ou la radiolyse. De faibles indices l'H₂ auraient été détectés dans des zones fracturées du socle granitique/gneissique. En 2023, des tests de débit et analyses des gaz ont été effectués (résultats guère concluant ?) après rabattement de l'aquifère du socle. Il s'avérerait que l'origine e l'H₂ serait due à la friction des outils métalliques de forages avec les roches !!

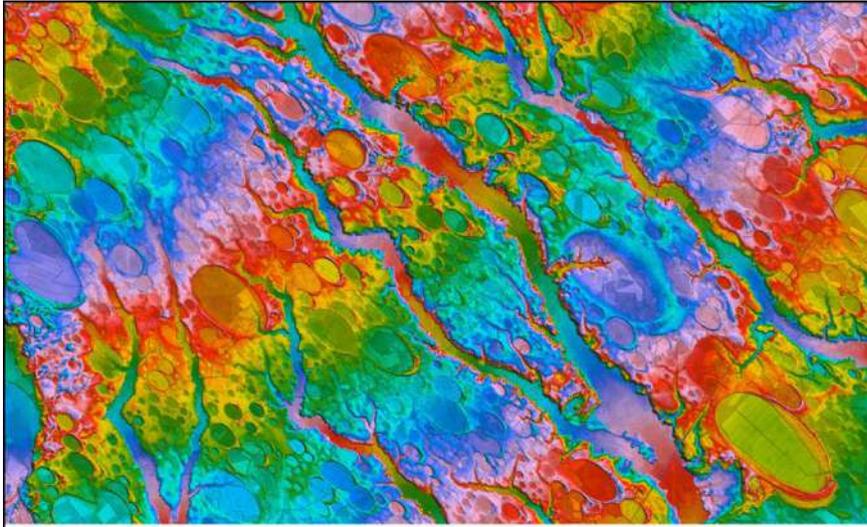


Image aérienne Lidar (=radar à faible pénétration), en fausses couleurs montrant des ronds de sorcières, dont les plus grands atteignant plus d'un km de diamètre. Côte atlantique de la Caroline du Nord, USA. D'après Viacheslav Zgonnik.

Images de ronds de sorcières en France

Quelques dizaines de ronds de sorcières auraient été détectés en France, mais nous n'avons pas trouvé d'information concernant leur localisation. A priori il n'y aurait pas de ronds de sorcières dans le Béarn, mais peut être dans le Comminges ? Commingeois, si vous avez des ronds bizarres sans végétation (et sans champignon !!) dans vos champs, ou des informations à ce sujet, nous sommes preneurs. On peut aussi passer quelques heures sur Google Earth pour traquer les ronds de sorcières potentiels !



Vue satellite de ronds de sorcières d'où s'échappe de l'hydrogène naturel. Photo 45-8 Energy, mais localisation non publiée ! Mais a priori pas dans le Béarn. Le type de végétation pourrait nous informer sur la localisation ?

Ce phénomène d'émanations d'hydrogène, via ces structures en ronds de sorcières, est un phénomène mondial de grande ampleur correspondant des environnements géologiques continentaux variés. Ces émanations montrent de fortes fluctuations au niveau de la journée ou sur des périodes de temps plus longues. Les émanations de chaque structure est relativement faible : quelques milliers à dizaines de milliers de m^3 /jour au maximum, mais si on prend en compte le total de centaines de structures, les flux ne sont alors plus négligeables. Pour donner un ordre de grandeur :

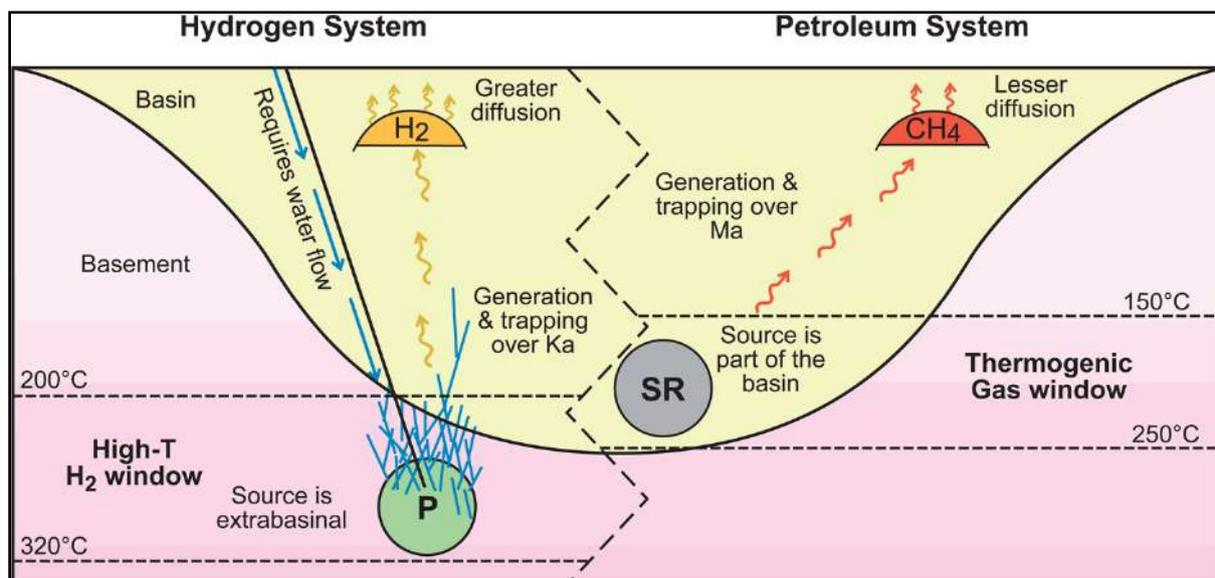
- émanation par structure individuelle de rond de sorcière 600 à 900 kg/jour
- émanation globale par surface 50 à 1900 kg/jour/ km^2 dépendant du nombre d'émanations par km^2 sur des zones de plusieurs centaines de km^2

Ces chiffres ne sont pas négligeables, bien que très faibles par rapport à la production de gaz naturel dans un puits pétrolier ... mais comment les capter commercialement ?

La présence de ronds de sorcières, pourrait constituer un argument pour dire qu'un système hydrogène est à l'oeuvre dans le secteur ; mais la prudence est de mise, car tous les ronds de sorcières ne correspondant pas forcément des émanations d' H_2 (cf. cas en Namibie) et qu'on peut générer relativement facilement quelques dizaines de ppm d' H_2 par friction avec les roches avec des outils métalliques d'échantillonnage des gaz dans les sols ou de forage, lorsqu'on étudie ces ronds de sorcières.

4-2-8 Bilan comparatif entre système pétrolier et système hydrogène

Le schéma ci-dessous résume les similitudes et différences entre le système pétrolier et le système hydrogène, dans le cas de roche source constituée de péridotites du manteau, puisque c'est le cas qui nous intéresse dans les Pyrénées.



Le système hydrogène versus le système pétrolier. Comparaison des systèmes fluides soulignant les différences de nature et de localisation de la roche source, en prenant en compte les sédiments, la roche source, les roches mères pétroliques. P = Protolithe. D'après O. Jackson et al, *Natural hydrogen : sources, systems and exploration plays. Geoenergy*, 2024-002, vol. 2.

En résumé :

- dans le système hydrogène, la roche source (ou protolithe, c'est-à-dire la roche originale avant sa transformation, par exemple les péridodites du manteau transformées en serpentinite sous l'action de l'eau) est située dans le « socle » et est géologiquement séparée des sédiments, à travers lesquels l'H₂ va migrer. Les péridodites du manteau en voie de serpentinisation sont situées plusieurs km sous le fond du bassin sédimentaire (exemple bassin de Mauléon ou du Comminges). Dans le système pétrolier, la roche source ou roche mère est située à l'intérieur du bassin sédimentaire et fait partie de la dynamique du bassin. Par exemple les roches mères jurassiques dans le bassin de Mauléon.
- la génération de l'hydrogène par serpentinisation des roches du manteau, d'un point de vue des temps géologiques, est considérée comme « instantanée » et quasi actuelle. On parle en milliers d'années (Ka). Les hydrocarbures sont générés à partir des roches mères sur des périodes de temps se comptant en millions ou dizaines de millions d'années (Ma).
- pour que le système H₂ fonctionne et donc pour que le phénomène de serpentinisation s'active, il faut des arrivées d'eaux météoriques continues en profondeur. Ce critère est inconnu dans le système pétrolier
- la fenêtre optimale de températures pour qu'une serpentinisation efficace se produise, il faut se situer de préférence entre 200 et 320 °C, alors que dans le système pétrolier, la fenêtre de températures pour former du gaz thermogénique, se situe entre 150 et 250 °C en fonction de la nature de la matière organique contenue dans la roche mère.
- A cause des caractéristiques différentes de la molécule d'H₂ et de CH₄, l'hydrogène se diffuse et migre plus facilement à travers les roches, que le méthane. L'hydrogène est deux fois plus mobile que le méthane.

Une autre approche pour l'exploration de l'H₂

Se baser sur l'approche et les méthodes d'application du système hydrogène est une façon « géologique » de faire de l'exploration, mais il existe aussi une autre approche plus pragmatique, qui consiste à s'intéresser aux anciens puits à objectif pétrolier, mais qui auraient trouvé (par chance ou inadvertance) des indices d'H₂ avec des teneurs plus ou moins importantes (de quelques % à plusieurs dizaines de %).

Récemment une quinzaine de puits forés dans le bassin de Sao Francisco au Brésil, près de Brasília, a trouvé des teneurs jusqu'à 40 % d'H₂, mais dans des réservoirs de qualité médiocre qui nécessitent une stimulation (la fameuse fracturation hydraulique souvent décriée !).

Plus près de nous, l'ancien forage des années 60 de Monzon-1 près de Huesca dans la Zone Sud Pyrénéenne, dans les grès du Trias, sous une épaisse couverture de sel triasique et cénozoïque, aurait trouvé des teneurs intéressantes, mais controversées d' H_2 ; seule la reprise de ce puits ou un nouveau forage, devrait permettre d'évaluer l'aspect commercial de cette découverte fortuite d' H_2 .

A noter que les puits qui contiennent de l' H_2 contiennent souvent d'autres gaz associés en particulier CH_4 , N_2 , CO_2 , Hélium avec des teneurs très variables. Si ces gaz présentent un intérêt commercial, comme l'Hélium, lors de la production la « covalorisation » de ces gaz associés à l' H_2 peut être un moyen de rendre économique un gisement.

Par exemple, des forages en Australie dans le socle précambrien ont montré dans des grès de base sous une couverture de sel, des teneurs d'environ 12 % d' H_2 , mais aussi 2 % d'He et du CH_4 (probablement d'origine abiologique ?).

4-2-9 Techniques d'exploration et de production de l'hydrogène

L'exploration pour l'hydrogène natif utilise à priori, beaucoup de méthodes et de technologies, qui sont déjà utilisées en exploration pétrolière, avec cependant quelques compléments provenant de la recherche minière ou de la géothermie.

Au niveau régional, la gravimétrie, le magnétisme, l'électromagnétisme sont utiles pour identifier des corps de péridotites et leur profondeur. Ces mêmes techniques utilisées à plus petite échelle, à maille plus serrée, permettront de préciser les variations de magnétisme en relation avec le degré de serpentinisation, puisque ce processus génère de la magnétite en plus de l'hydrogène.

La sismique passive (les tremblements de terre naturels étant alors la source d'émission des ondes sismiques) pourront aider à définir les structures profondes. La sismique classique (camions vibrateurs créant des ondes sismiques), soit par retraitement d'anciens profils, soit par l'acquisition de nouvelles campagnes, permettront de définir les structures, surtout les pièges et chemins de migration de l' H_2 à l'instar de ce qui se fait en exploration pétrolière.

L'analyse des indices de surface est une technique qui peut identifier les zones où une « cuisine » à hydrocarbures ou à hydrogène est en action, mais sans prédire l'existence d'accumulations commerciales. Dans le cas de l'hydrogène, des techniques spécifiques de mesures des émanations d'hydrogène dans les sols ont été mises au point.

Techniques de forages et de production

Les techniques de forages pour l'hydrogène sont à priori les mêmes que pour les hydrocarbures ou la géothermie. Par contre lors de la production (via les tubages de puits), il faut se méfier de l'action de l'hydrogène sur certains aciers qui les rend fragiles et cassants. Ce n'est pas sans rappeler les problèmes avec l' H_2S contenu dans le gaz de Lacq qui corrodait les tubages des puits et il a fallu mettre au point des aciers spéciaux pour pallier à cette corrosion.

Dans un gisement gazier ou à huile, ces fluides plus légers que l'eau s'accumulent dans le piège, sous forme gazeuse ou liquide, au-dessus de ce qu'on appelle le plan d'eau. Et on produit directement ces fluides par des puits de production. Pour l'hydrogène, ce schéma idéal risque d'être mis en cause, car l'hydrogène en fonction de la température et de la pression ambiante, va être plus ou moins soluble dans l'eau. On produirait surtout de l'eau contenant de l'hydrogène dissous, qui devrait être séparé, par dégazage, en surface.

Certains chercheurs cherchent à mettre au point une crépine spécifique qu'on descendrait dans un forage au niveau des couches contenant de l'hydrogène dissout. Une crépine spéciale avec des membranes laissant passer que l'hydrogène permettrait de récupérer directement l'hydrogène sous forme gazeuse en profondeur.

Unité : m³ ou Kg ou t (tonne)

Pour l'hydrogène on parle en kilogramme ou en tonne, alors que pour les gisements de gaz naturel on parle en m³ ou en millions/milliards de m³, mais pour un puits ou un indice de surface, les débits d'hydrogène sont bien exprimés en m³/jour (sous une certaine pression), comme pour les gisements de méthane, ce qui facilite les comparaisons.

L'hydrogène a une masse volumique très faible et il faut se rappeler que 1 kg d'hydrogène occupe un volume de 11 m³ aux conditions standard de pression et de température (15°C et pression d'une atmosphère). Mais à une pression de 700 bars (pression des réservoirs de stockage) 42 kg d'hydrogène n'occupent qu'1 m³.

Grosso modo, il suffit de multiplier par un facteur de 10 pour passer des kg au m³ et inversement diviser par 10 pour passer des m³ au kg (mais en conditions standards).

5- Application du système H₂ au gisement de Bourakébougou, au Mali

A savoir que c'est le seul petit gisement d'hydrogène actuellement en exploitation depuis plus de 10 ans, à travers le monde et servant, via un moteur à combustion modifié et un générateur, à produire de l'électricité pour un usage local. Il est donc utile de bien définir les caractéristiques d'un tel gisement qui pourrait servir d'analogie pour l'exploration ailleurs dans le monde.



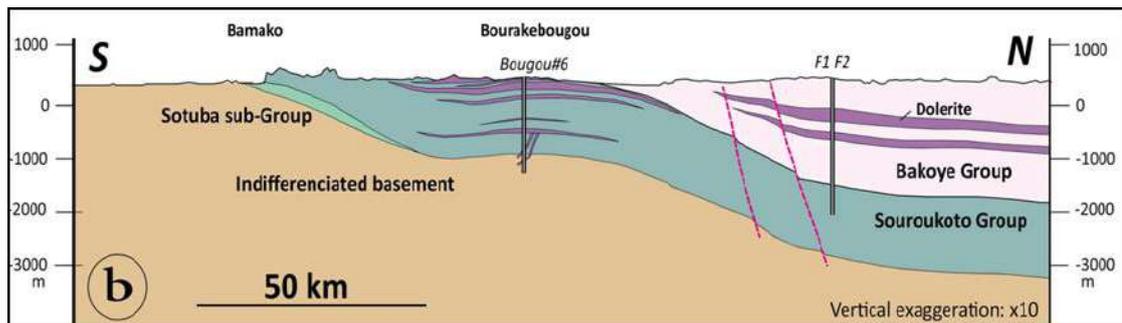
Petite centrale électrique de Bourakébougou, comportant un moteur de camion Ford modifié pour fonctionner directement avec de l'hydrogène, couplé à un générateur d'électricité de 35 KV qui fournit 7 KW et qui n'a que de l'eau pure comme résultat de la combustion ! Et ce, avec un très faible coût de production. Une partie du village est éclairée par cette électricité très peu polluante. Source Hydroma

Une production, relativement modeste (1 400 m³/j à 4 bars de pression, par comparaison les puits de gaz naturel/méthane des gisements près de Lacq avaient des débits initiaux de l'ordre du million de m³/jour à forte pression de plusieurs centaines de bars) mais continue au Mali depuis 12 ans, a démontré que réservoirs et couvertures existaient pour ce type de gaz. La pression n'a jamais baissé dans le réservoir exploité, il se remplit donc continûment.

Malgré les efforts de la compagnie Hydroma qui possède ce permis, la production n'est toutefois pas passée à une échelle industrielle, les conditions politiques au Mali étant en particulier trop difficiles. Mais la délinéation du champ continue, trois autres réservoirs ont été trouvés à différentes profondeurs.

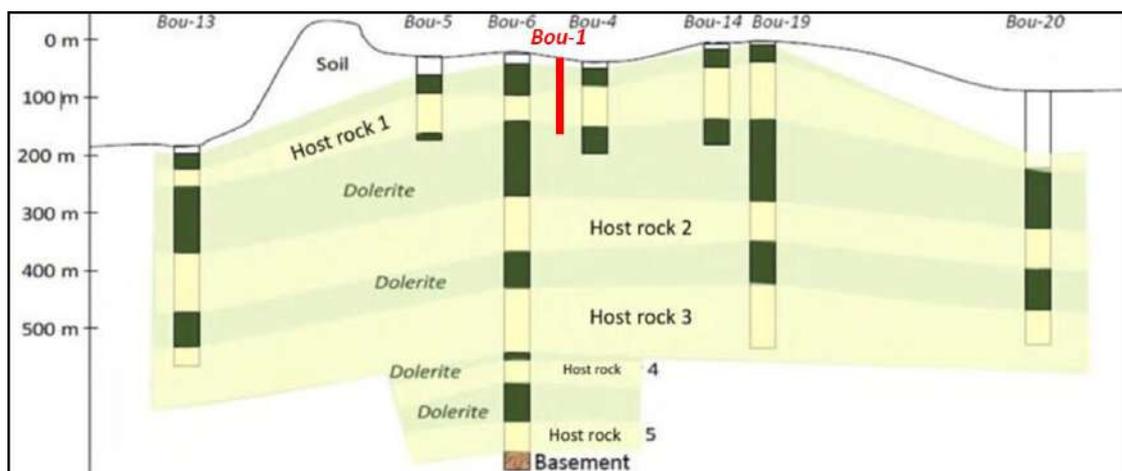
Pour un géologue d'exploration pétrolière, qui instinctivement par comparaison, se réfère au gisement de gaz (méthane) ce gisement du Mali présente des caractéristiques plus qu'inhabituelles.

- découverte fortuite en 1997 lors d creusement d'un puits d'eau à 100 m de profondeur mais sec ? Mais c'est seulement en 2012 que l'hydrogène a été identifié ... à cause d'une cigarette allumée !
- composition du gaz à 98 % d'hydrogène (1% d'azote et 1% de méthane) débit modeste de 1400 m³/jour, mais constant depuis 12 ans.
- la roche source de l'hydrogène n'a pas été formellement reconnue mais ces sont probablement les roches riches en fer du socle néo-protérozoïque, datées à plus de 2 milliards d'années.
- cinq réservoirs superposés, à quelques centaines de mètres de profondeur, relativement classiques : carbonates karstifiés pour les réservoirs supérieurs, mais aussi des réservoirs gréseux plus profonds, tous d'âge néo-protérozoïque, vers – 700 Ma. Pour mémoire, des gisements de méthane dans des réservoirs aussi anciens sont l'exception (ex Sibérie orientale).



Coupe géologique simplifiée du gisement de Bourakébougou, au Mali. D'après O. Maiga et al, Nature, article n° 11876, 2023, Characterization of the spontaneous recharging natural hydrogen reservoir of Bourakébougou in Mali.

- roche couverture plus qu'originale: des sills de dolérite (roche volcanique intrusive d'âge triasique) à priori très efficaces. Encore une originalité car n'existe pas pour les gisements de méthane (à ma connaissance, sauf exception ?). A savoir que les pressions sont faibles (quelques bars) Cette couverture de dolérite serait-elle encore efficace avec des pressions bien plus grandes de quelques centaines de bars ?
- piège : voussure anticlinale qui déforme aussi les dykes de dolérites. Fermeture structurale d'environ 8 km².



Coupe géologique simplifiée montrant divers puits et surtout la superposition des réservoirs et des sills de dolérite, en forme de voussure anticlinale. D'après O. Maiga et al, Nature, article n° 11876, 2023, Characterization of the spontaneous recharging natural hydrogen reservoir of Bourakébougou in Mali

- le gisement n'est à priori pas associé à des émanations de surface car aucun rond de sorcière n'a été observé à proximité immédiate. Cela pourrait s'expliquer que les couvertures de

dolérites sont localement bien étanches, ou que l'hydrogène émis est consommé par le sol latéritique.

- au total une trentaine de forages ont été réalisés. En 2018, 12 forages d'exploration de 105 à 1807 m de profondeur (atteignant le socle granitique), en 2022 plusieurs forages complémentaires. Les forages de 2022 montrent la présence d'H₂ à 98 % de concentration avec des traces d'Hélium. Les forages de 2018 ont été retestés et montrent aussi la présence d'H₂ dans les 5 niveaux réservoirs.
- apparemment la recharge du gisement est permanente, la pression a même augmenté sur une période de 12 ans (de 4 à 4.5 bars) depuis le début de la production constante à environ 1400 m³ /jour démontrant que la génération d'H₂ est actuelle, continue et compense la production. Phénomène jamais observé pour des gisements de méthane qui ne se remplissent que très lentement à des échelles géologiques en Ma ou sont souvent des gisements fossiles qui ne se remplissent plus.
- Rappel : la production du puit de BOU-1 est d'environ 1400 m³ /jour à une pression d'environ 4 bars ce qui correspond à une production de 468 Kg/jour d'H₂ soit 171 t/an. Sur base des 30 forages d'exploration, la ressource exploitable totale estimée de ce gisement d'hydrogène serait de 60 Gm³ soit 5,4 Mt.
- H₂ sous forme dissoute dans l'aquifère (- 800m) et sous forme gazeuse au dessus de l'aquifère.
- attention à l'interprétation des logs dans les réservoirs à hydrogène, le log neutron semble « surexcité ».

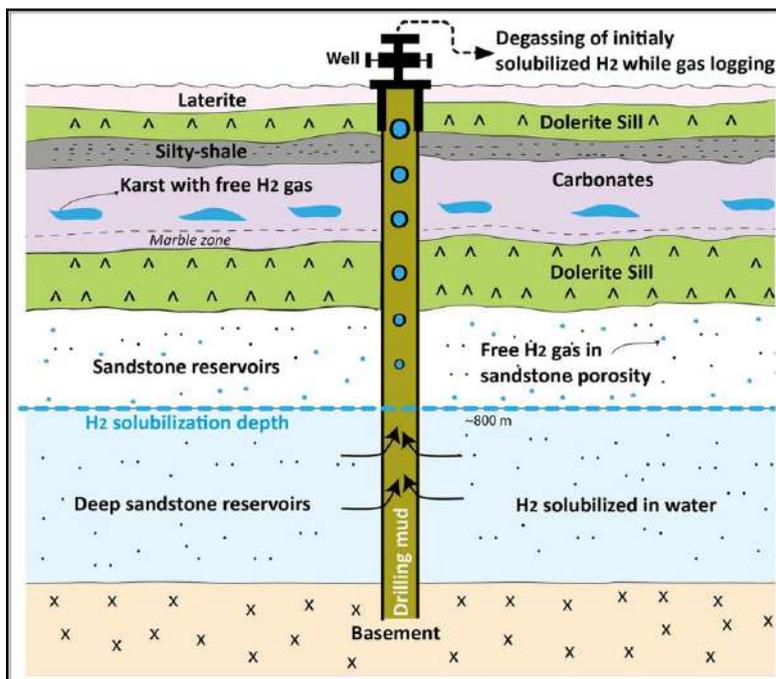


Schéma synthétique montrant la présence d'hydrogène libre en phase gazeuse dans les réservoirs carbonatés et gréseux supérieurs, et l'hydrogène dissous dans l'eau en profondeur. Le doublet réservoir/roche couverture de dolérite est aussi bien illustré. D'après O. Maiga et al, Nature, article n° 11876, 2023, Characterization of the spontaneous recharging natural hydrogen reservoir of Bourakebougou in Mali.

On ne peut que constater que ce petit gisement possède des caractéristiques inhabituelles, qu'on ne retrouve pas dans les gisements classiques de méthane. Il faut donc faire preuve d'originalité et d'innovation, en gardant un esprit ouvert et en sachant s'adapter pour la prospection de l'hydrogène.

6- De l'hydrogène blanc/natif dans les Pyrénées ?

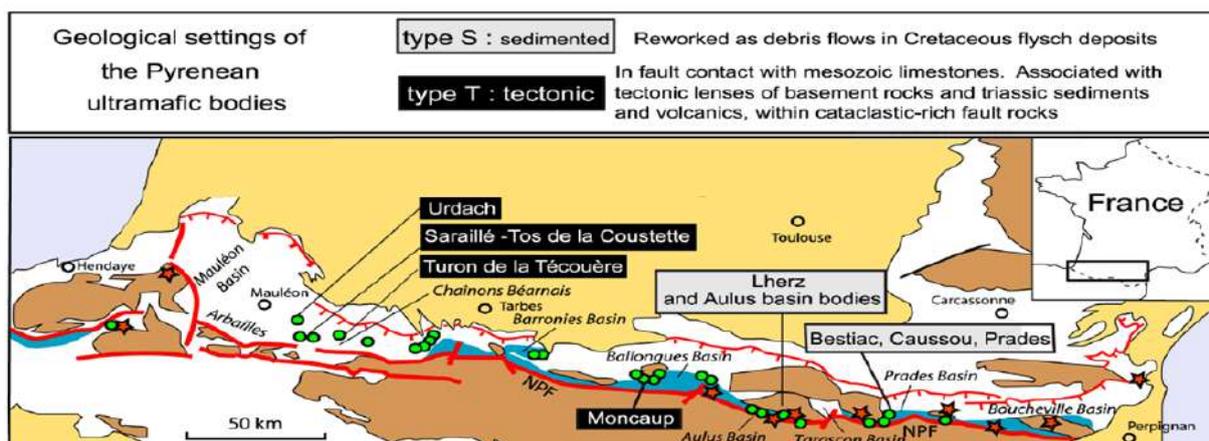
Et maintenant nous arrivons enfin au coeur du sujet de ce module de Géol Pyr : en appliquant les concepts du système hydrogène, que peut-on en déduire au sujet du potentiel hydrogène natif dans les Pyrénées ?

Pour les géologues qui connaissent un peu l'histoire géologique des Pyrénées, ils savent qu'à une époque ancienne, à la place de la chaîne actuelle de montagnes des Pyrénées, existait un rift, à l'Albien, constitué de plusieurs bassins en relai, où localement affleurait en fond de rift, le manteau exhumé, constitué de péridotites, appelées lherzolites dans les Pyrénées (d'après l'étang de Lherz en Ariège où ces roches ont été initialement définies). Donc une roche source potentielle pour l'hydrogène, si ces péridotites sont sujettes à une serpentinisation par action de l'eau.

6-1 Les péridotites/lherzolites du manteau à l'affleurement dans les Pyrénées

On sait que ce rift a été repris en compression lors de la phase orogénique pyrénéenne, que tout a été déplacé, mais on peut encore actuellement reconnaître des reliquats de ce rift. Les péridotites/lherzolites dans les Pyrénées se retrouvent en surface localement, justement à cause de la compression pyrénéenne. Ces lherzolites affleurent sous forme d'un chapelet d'une quarantaine de petits corps de péridotites tout le long de la Zone Nord Pyrénéenne, nous indiquant où était l'axe du rift ancien avec ses péridotites exhumées en fond de rift.

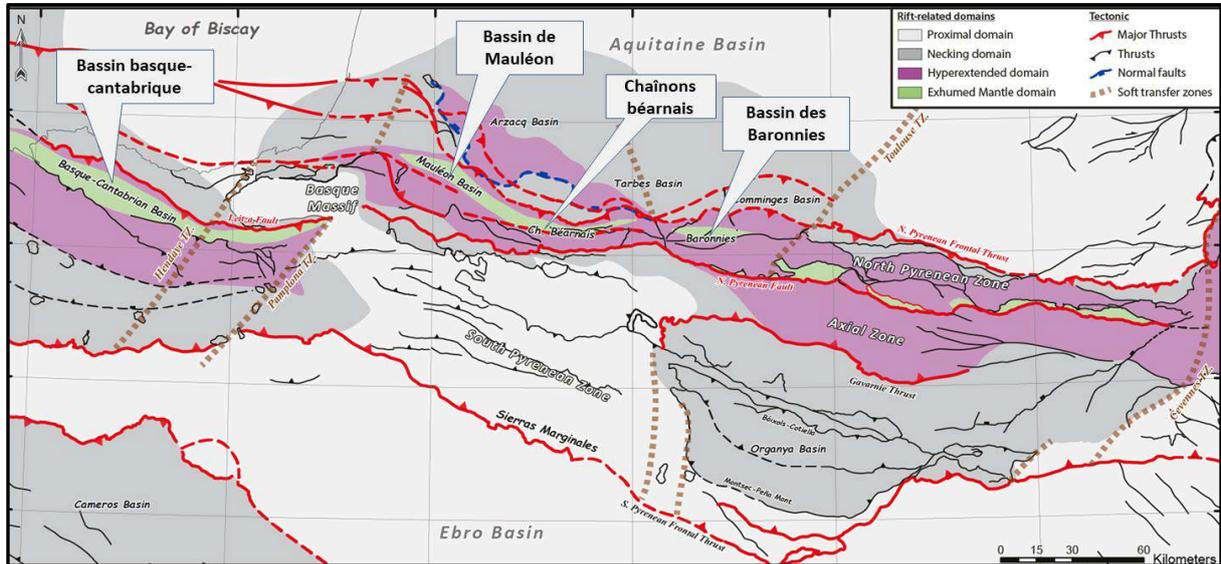
Des études sur les affleurements des pointements de lherzolites de Montaut, du Turon de la Técoùère et d'Urdach ont montré l'existence de phénomènes d'altération hydrothermale mais surtout de serpentinisation à des degrés divers (parfois hérités de l'épisode d'exhumation du manteau au moment du rift albien). Des anomalies d'hydrogène dans les sols (jusqu'à 1000 ppm) en périphérie des affleurements de lherzolites du Turon de la Técoùère et d'Urdach ont également été détectées, mais l'origine de ces gaz ne proviendrait pas de sources profondes, mais pourraient correspondre à des processus de serpentinisation à basse température et/ou au relâchage de paléo-gaz piégés dans les roches sub-affleurantes. Ces données récentes (2021) confirmeraient que les lherzolites pourraient constituer des roches sources, mais ce ne sont pas ces petits corps en surface qui sont utiles, mais de bien plus vastes corps de péridotites en profondeur pouvant générer de gros volumes d'hydrogène.



Localisation des affleurements de roches ultrabasiques (= lherzolites) en provenance du manteau et leur classification (Type Sédimenté et type Tectonique en fonction de leur cadre géologique local). Ce chapelet d'une quarantaine de petits pointements de lherzolites est un témoin de l'ancienne zone de manteau exhumée lors du rifting albien, mais intensément déformée et déplacée lors de la compression pyrénéenne dans la ZNP. D'après Lagabrielle et Bodinère 2008 et thèse Filleaudeau, 2011.

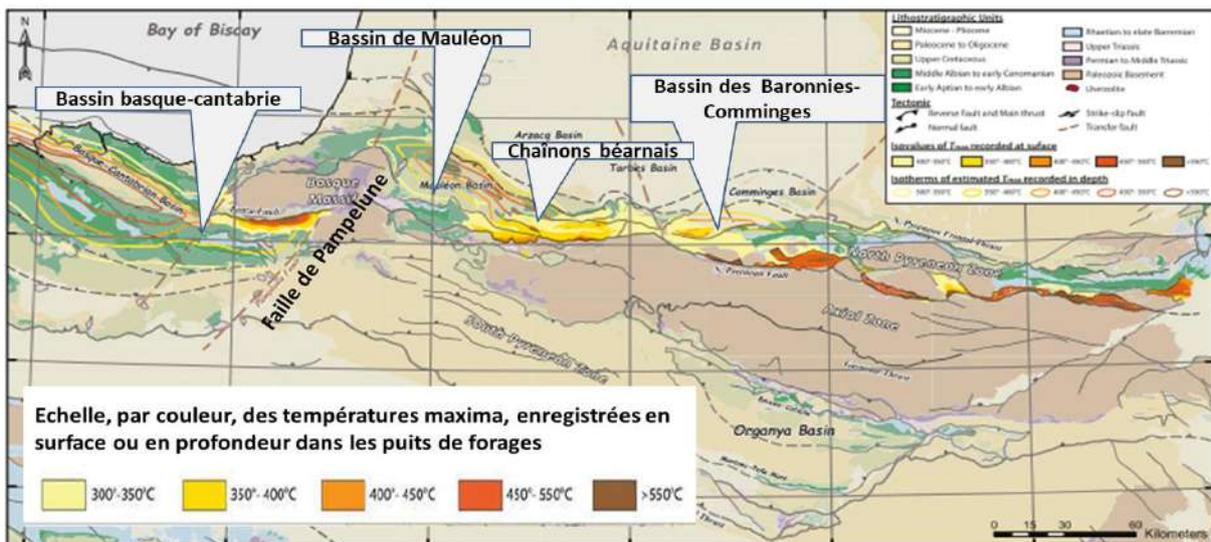
Les péridotites du manteau exhumées dans le fond du rift albien

Au moment de l'ouverture du rift albien en hyper-extension, en fond de rift, localement le manteau pouvait affleurer. La carte suivante montre que dans le bassin basque-cantabrique, le bassin de Mauléon, son extension vers l'est dans les chaînons béarnais et le bassin des Baronnies/Comminges, le manteau était exhumé en fond de rift. La question qu'on doit se poser : actuellement, alors que la phase de compression pyrénéenne est passée par là, à quelle profondeur le manteau se trouve-t-il ?



Carte des divers domaines associés au rift albien. Le manteau était alors exhumé localement en fond de rift dans le bassin basque-cantabrique, le bassin de Mauléon, les chaînons béarnais, le bassin des Baronnies et quelques autres petits bassins (en vert clair sur la carte) dans la Zone Nord Pyrénéenne des Pyrénées centrales et orientales. D'après Tugend et al. (2014), Lescoutre & Manatschal (2020), et Ducoux et al, 2023.

Par ailleurs, les roches sédimentaires déposées dans ce rift (à cause des hautes températures induites par la proximité du manteau) ont été affectées par un métamorphisme original dit de Haute Température et Basse Pression. Des mesures de terrain couplées avec les données acquises dans les puits pétroliers ont permis de cartographier cette zone de métamorphisme, dite Zone Interne Métamorphique ou ZIM (consulter le module n° 13 de Géol Pyr). Nous disposons donc d'un autre indice pour localiser l'ancien rift, en plus des cartes géologiques classiques.



Carte interprétative du métamorphisme HT-BP de l'ensemble de la chaîne Cantabrique/Pyrénées, combinant les températures maximales mesurées, soit en surface (ex spectrométrie Raman) soit les températures estimées en

6-2 Les zones avec des Iherzolites à des profondeurs acceptables dans les Pyrénées ?

Le terrain de chasse pour l'hydrogène dans les Pyrénées se précise: c'est à priori la Zone Nord Pyrénéenne et son extension dans le bassin basque-cantabrique. Maintenant il faudrait déterminer où le manteau se trouve encore actuellement à des profondeurs acceptables par exemple moins de 10 km et non pas à 30 km+ de profondeur habituelle pour le sommet du manteau. Ceci pour diverses raisons: pour être à priori dans la fenêtre adéquate de températures pour une serpentinisation optimale, pour que des failles profondes puissent s'enraciner dans le manteau, aussi bien pour permettre à l'eau de pénétrer dans ce manteau, mais aussi pour que l'hydrogène généré puisse migrer vers la surface en espérant qu'il trouvera des pièges sur son chemin de migration.

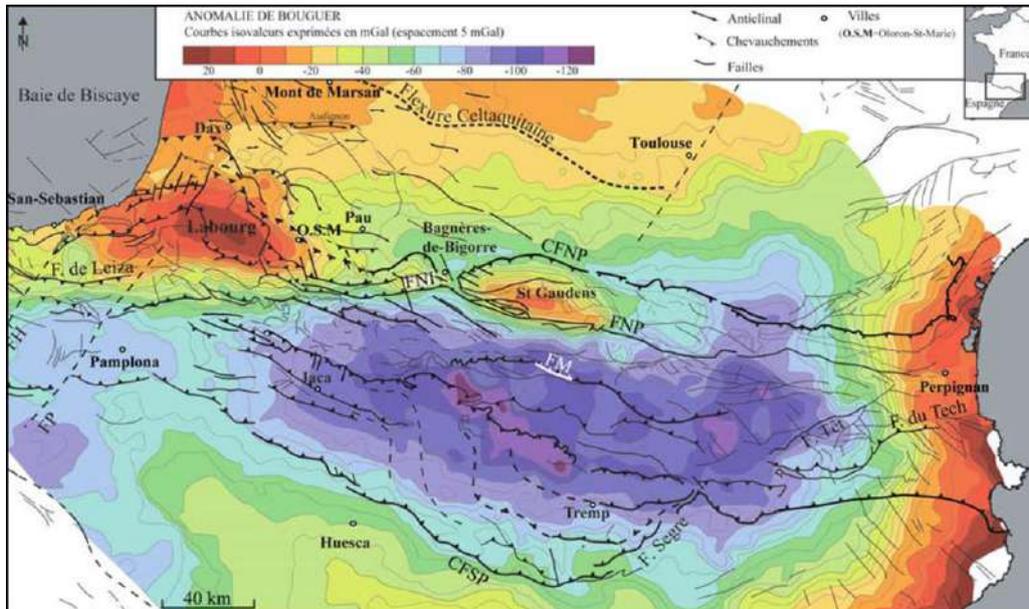
C'est là que les méthodes géophysiques interviennent ;

- la **gravimétrie**, qui permet de détecter des corps de densité élevée (c'est le cas des péridotites) mais aussi d'évaluer leur profondeur.
- les **données magnétiques** sont complémentaires de la gravimétrie, l'association d'un corps dense et fortement magnétique laisserait supposer la présence d'une roche ultrabasique partiellement, voire totalement serpentinisée. Cette anomalie est liée à la magnétite produite lors de la serpentinisation.
- la **tomographie sismique** (à partir de sismique passive) permet d'imager en profondeur les structures géologiques. Elle permet de confirmer la présence des corps denses mais également la présence d'anomalies de vitesses sismiques qui pourraient être associées à la présence de fluides en profondeur.
- les **données sismiques « classiques »** obtenues le long des profils (via des camions vibrateurs) permettent la caractérisation et la localisation des structures des bassins et la migration de fluides le long des failles. C'est l'outil de prédilection des explorateurs pétroliers. De plus ce type de données permet de détecter la présence de roches salifères qui peuvent être propices à un piégeage de l'hydrogène.
- les données de **résistivités (méthodes de magnéto-tellurique)** peuvent également être un plus, car elles permettent de mettre en évidence la présence de circulations fluides actuelles en profondeur, soulignant ainsi une potentielle migration.

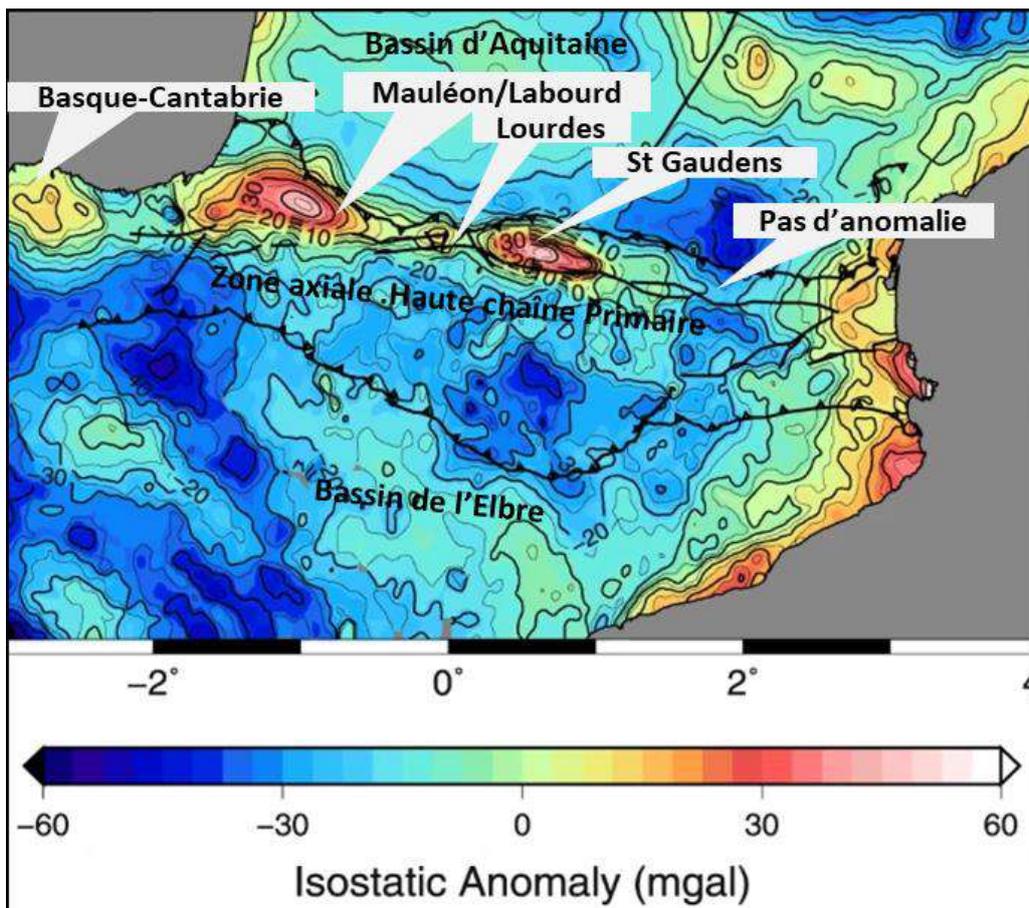
Exploration de l'Hydrogène natif			
Stade	Reconnaissance régionale	Reconnaissance locale	Exploration du sous-sol
Techniques et méthodes d'évaluation	Identification d'indice de surface	Identification de la source et des zones d'accumulation	Analyses direct du potentiel de la zone d'intérêt
	Utilisation de données préexistantes - Cartes géologiques : Analyse du contexte géodynamique, localisation des failles majeures structurant la zone d'étude et des résurgences de sources hydrothermales, affleurement de roches ultrabasiques. - Télédétection : Analyses de MNT, carte satellite pour repérer d'éventuelle zone de dépression associées à des occurrences d'H ₂ Acquisition de données - Analyses géochimiques : Détection d'anomalies en concentration des gaz du sol pouvant être associées à des circulations fluides plus ou moins profonde. Caractérisation géochimique des sources hydrothermale détectée sur la carte et lors de la prospection géochimique	Acquisition de données géophysiques - Gravimétrie : Permet de déterminer la présence de corps dense en proche surface potentiellement associé à des roches mantelliques. - Magnétique : Permet de déterminer si le corps dense est en cours de serpentinisation et/ou serpentinisé. - Tomographie sismique : Imager les structures géologiques profonde et détecter d'éventuelle anomalie de vitesse associée à la circulation de fluide. - Données sismiques : Caractérisation des structures géologiques permettant la migration de fluide et son accumulation. - Résistivité Données magnétotelluriques imageant les circulations fluides actuelles plus ou moins profonde	Réalisation d'un forage d'exploration Suite à l'analyse complète des données de la littérature et issue des campagnes d'acquisitions, un forage peut être réaliser dans la zone à plus fort potentiel.
Objectifs	Détection d'anomalies en surface	Identification des cibles en profondeur	Estimation et évaluation des ressources
Dimension	2D	2D et 3D	2D
Echelle	x 100 à 1000 km ²	x 10 - 100 km ²	Données ponctuelles

Résumé des techniques et méthodes d'évaluation utilisables pour l'exploration de l'hydrogène natif. D'après Nicolas Lefeuvre, Thèse Grenoble, 2022.

Plusieurs anomalies gravimétriques ont été détectées en particulier les anomalies de Mauléon, Lourdes et St Gaudens, toutes localisées dans la Zone Nord Pyrénienne et alignées parallèlement au « trend » général de la chaîne.



Carte structurale superposée à la carte des anomalies de Bouguer, modifiée d'après Bayer et al. (1996) et Casas-Sainz et al. (1997). CFNP : Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen, FNP : Faille Nord Pyrénéenne, FNI : Faille Nord Ibérique, CFSP : Chevauchement Frontal Sud Pyrénéen, FH : Faille d'Hendaye, FP : Faille de Pampelune, FM : Faille de la Maladeta. OSM : Oloron-Ste-Marie



Carte gravimétrique isostatique des Pyrénées. Avec les anomalies positives, du bassin basco-cantabrique l'anomalie du Labourd correspondant au bassin de Mauléon, l'anomalie de Lourdes, l'anomalie de St Gaudens correspondant au bassin du Comminges/Baronnies. A noter l'absence de ce genre d'anomalies plus à l'est dans les Pyrénées Orientales. D'après Lacan (2008), modifiée d'après Bayer et al. (1996) et Casas et al. (1997)

L'origine des anomalies gravimétriques positives dans la Zone Nord Pyrénéenne (et son extension vers l'ouest dans le bassin cantabrique) est due à des corps dans la croûte supérieure, mais de densité trop élevée, pour être expliquée en termes de matériaux crustaux. Ils sont interprétés comme des segments du manteau supérieur qui proviennent de la ténésion NS et mis en place à des relatives faibles profondeurs, par l'intermédiaire de chevauchements importants lors de l'orogénèse pyrénéenne. C'est la première fois que des évidences ont été présentées de corps mantelliques dans les Pyrénées. Il est suggéré que leur absence vers l'est est causée par une moindre extension entre Ibérie et l'Europe dans cette région durant les mouvements entre les 2 plaques, avant l'orogénèse, ce qui limite l'ascension de matériau en provenance de la profondeur. La plus grande extension dans la partie ouest a permis au manteau supérieur de monter dans le vide ainsi créé entre Ibérie et Europe, et qui sera encore davantage remonté par les chevauchements associées avec l'orogénèse pyrénéenne. *D'après Lacan (2008), modifiée d'après Bayer et al. (1996) et Casas et al. (1997)*

Cette carte gravimétrique régionale ci-dessus couvrant toutes les Pyrénées, montre plusieurs anomalies gravimétriques positives situées toutes dans la Zone Nord Pyrénéenne et son extension vers l'ouest dans le bassin cantabrique. Ces anomalies positives ont un certain intérêt :

- l'anomalie de St Gaudens, située à l'aplomb du bassin sédimentaire des Baronnies-Comminges et interprétée comme correspondant à un corps allochtone du manteau à 8-16 km de profondeur, poussé vers le nord sur le bassin d'Aquitaine, via le Front de Chevauchement Nord Pyrénéen.
- l'anomalie de Lourdes de dimension plus restreinte. Profondeur du manteau ?
- l'anomalie du Labourd-Mauléon, à l'aplomb du bassin sédimentaire de Mauléon que nous allons examiner en détail.
- l'anomalie basque-cantabrique, correspondant au bassin sédimentaire du même nom. Profondeur du manteau ?

Pour ces anomalies, Mauléon, Lourdes, St Gaudens, se trouvent déjà réunis quelques éléments du puzzle du système hydrogène :

- une roche source potentielle du manteau, avec des phénomènes de serpentinisation pouvant générer de l'hydrogène à des profondeurs de 8 à 16 km.
- l'existence de chemins de migration de l'hydrogène depuis les roches sources vers la surface ou des pièges potentiels, à la faveur de failles profondes appartenant à la Zone Nord Pyrénéenne.
- présence de sel triasique relativement continu, pouvant constituer une excellente roche couverture.

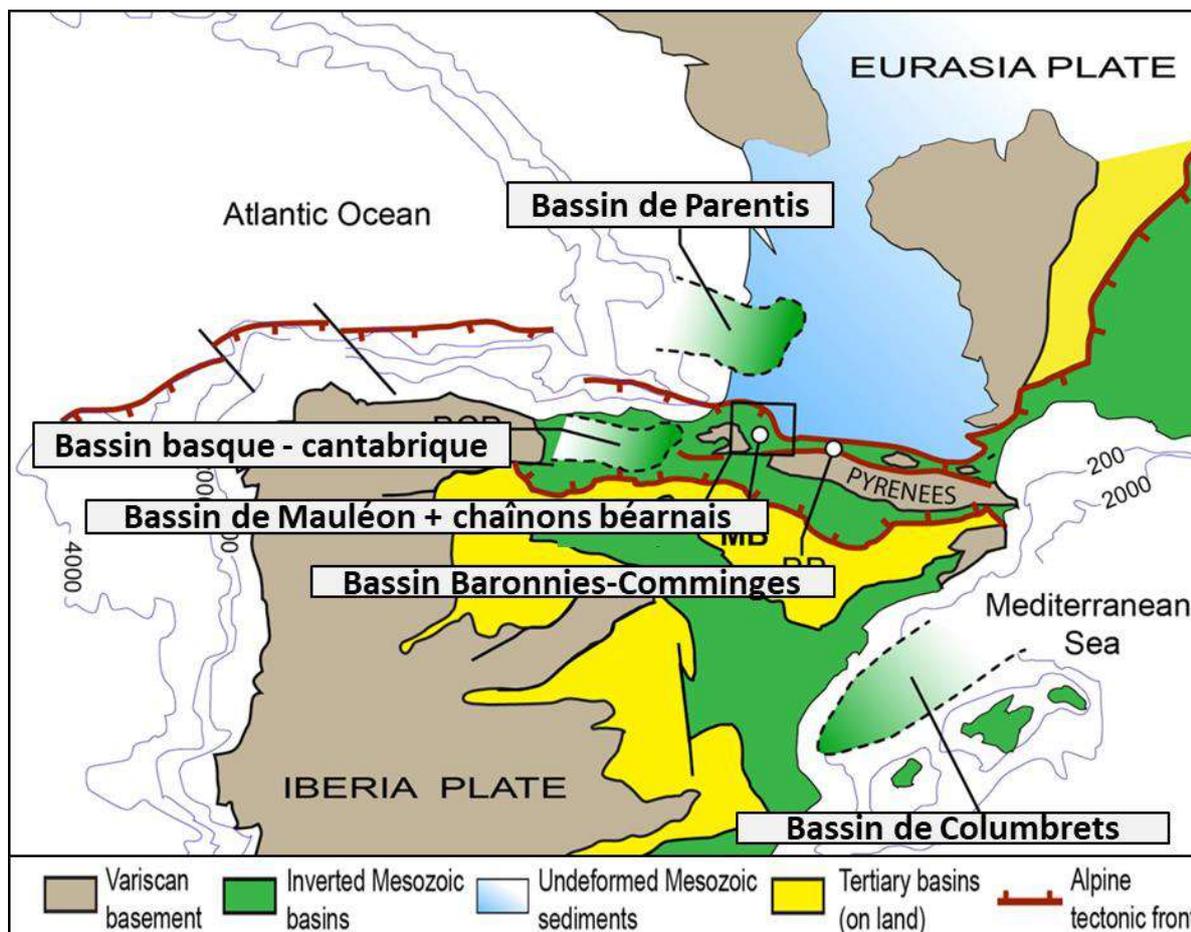
6-3 Le potentiel hydrogène du bassin de Mauléon

A savoir que le bassin de Mauléon, possède un élément supplémentaire déterminant du système hydrogène : des indices de surface mis en évidence au cours de la thèse de N. Lefeuvre publiée en 2022. Ce critère explique que l'exploration hydrogène s'est focalisée sur ce secteur et a commencé prioritairement dans ce bassin, puisque un système hydrogène semble fonctionner dans cette zone, mais sans savoir s'il existe des accumulations commerciales. C'est ce que devra vérifier les travaux d'exploration au cours des prochaines années.

La zone prioritaire ayant été sélectionnée, c'est-à-dire le bassin de Mauléon, examinons donc le potentiel hydrogène de ce bassin de Mauléon, toujours en utilisant le concept du système hydrogène tel que nous connaissons désormais.

6-3-1 Cadre géologique du bassin de Mauléon.

Le bassin de Mauléon est un des bassins avec remplissage de type rift à l'Albien, avec localement exhumation du manteau en fond de rift, appartenant à la chaîne Pyrénées-cantabrique, puis inversé et réactivé tectoniquement lors de la phase pyrénéenne.



Carte structurale simplifiée avec les divers bassins albiens inversés de l'orogène Pyrénéen-cantabrique. D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution in a Hyperextended Rift Suture: Implication for Natural Hydrogen Exploration (Mauléon Basin, Pyrenees)*. *Tectonics*, 2024, 43 (8).

Contrairement aux modèles conceptuels récemment présentés dans diverses publications, le bassin de Mauléon ne résulte pas de la simple inversion tectonique pyrénéenne d'un rift albien avorté impliquant un amincissement crustal N-S extrême, avec détachement et décoiffement mantellique. Il s'agit en réalité d'un élément de ce rift au sein duquel le décrochement régional W-E senestre dominant entre ses marges européenne et ibérique a généré dès l'Aptien terminal un fossé oblique de type « pull-apart », le fossé de Tardets-Sorholus. C'est à la faveur des failles listriques transverses d'orientation SW-NE du Barlanès et du Saison, particulièrement actives, que s'est réalisé ensuite, à l'Albien supérieur-terminal, l'amincissement crustal majeur, pouvant conduire localement (Urdach) au décoiffement mantellique. Par la suite, au début du Crétacé supérieur, ce fossé s'est élargi par transtension pour laisser place au bassin de Mauléon. Ainsi interprété, ce dernier bassin s'intègre logiquement au sein du rift composite crétacé nord-pyrénéen en prenant place entre le bassin de Bilbao à l'ouest et les bassins plus orientaux des Pyrénées centrales et orientales où le mouvement décrochant senestre W-E, voire transpressif, devient dominant, interdisant tout décoiffement mantellique. C'est l'inversion du mouvement et la généralisation de la transpression qui, à partir du Crétacé supérieur-terminal, conduiront à la fermeture de ce fossé puis à la surrection graduelle, cette fois d'est en ouest, de la chaîne pyrénéenne. Texte d'après J Canérot, 2017 et 2023

Ce bassin de Mauléon est unique, car il a conservé en grande partie ses anciennes structures transtensives datant du Crétacé, car la compression pyrénéenne a été plus tardive et moins accusée que dans les Pyrénées orientales et centrales. Pour des informations détaillées sur la géologie de ce bassin de Mauléon, consulter les deux publications de J. Canérot, accessibles dans la rubrique « pour aller plus loin » en fin de module. Nous nous focaliserons que sur les critères géologiques utiles pour la définition du système hydrogène dans ce bassin.

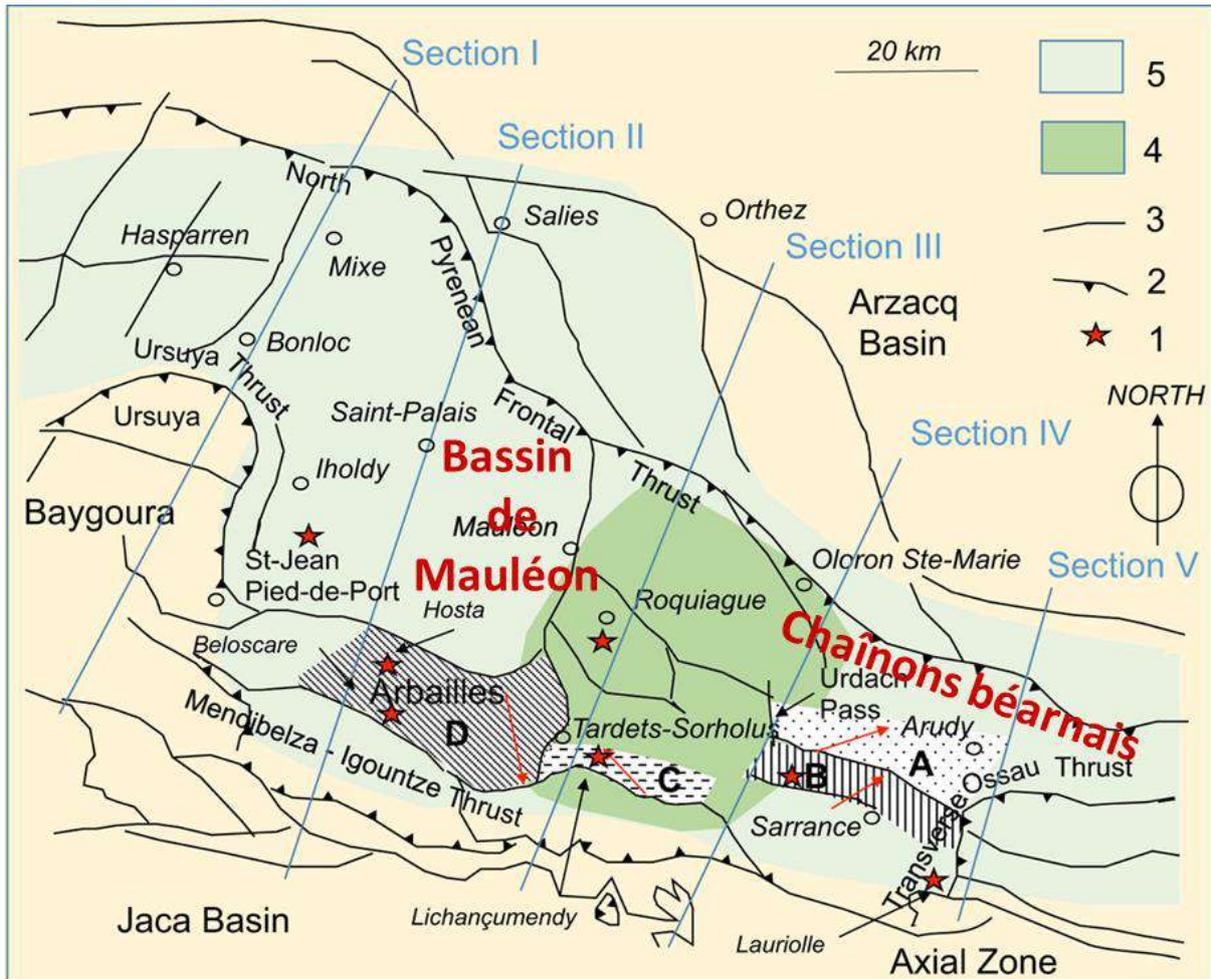
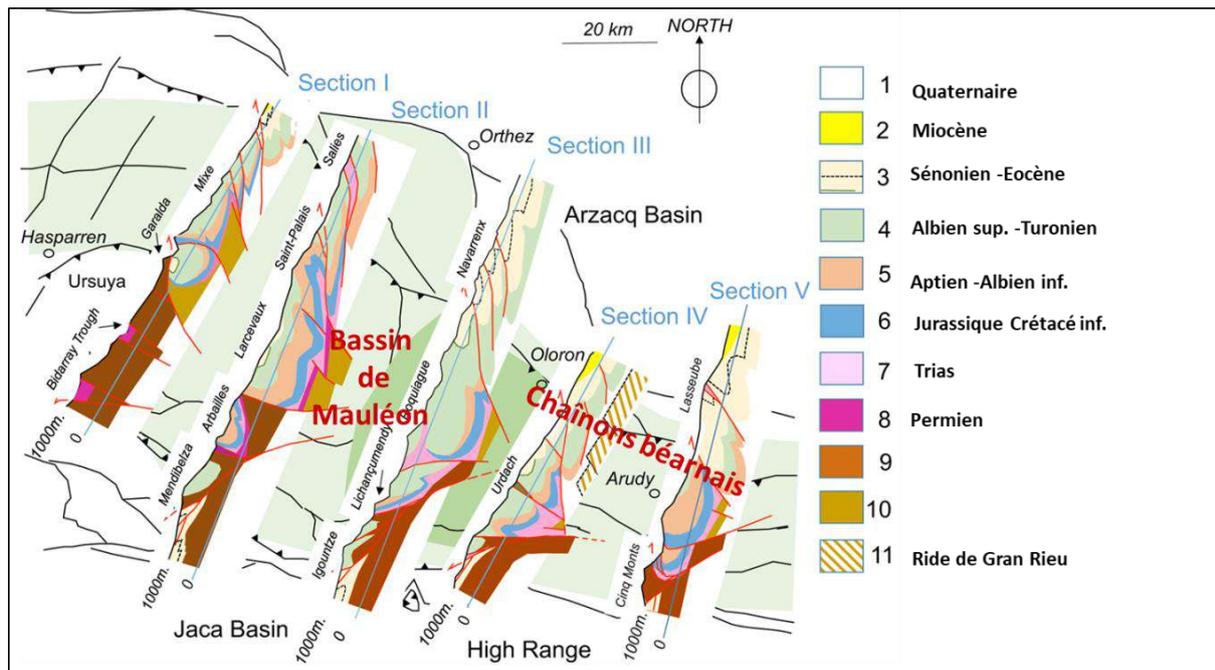
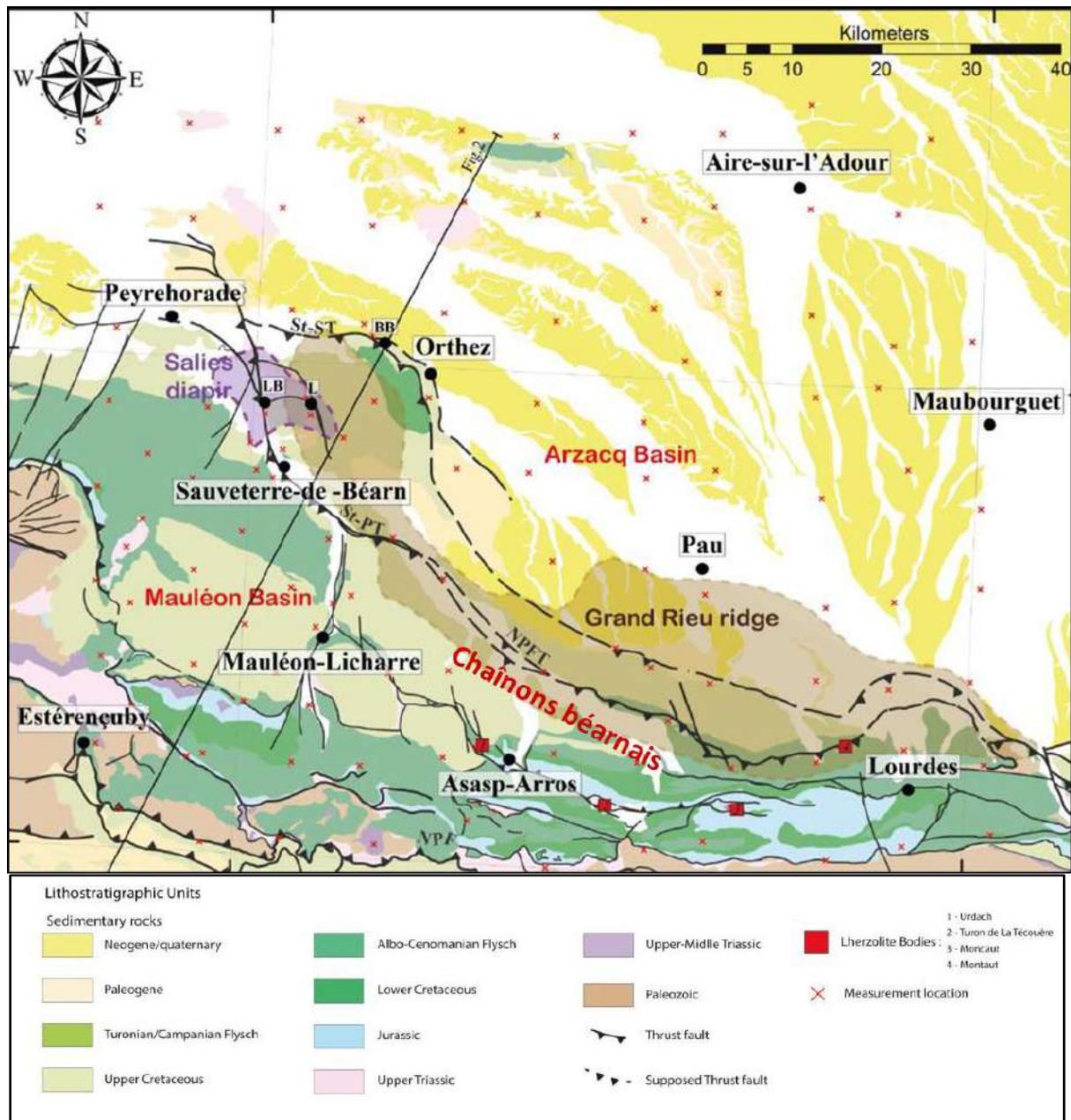


Schéma structural du bassin de Mauléon et de son prolongement vers les SE vers les chaînons béarnais.

Légende A: bloc du Mail Arrouy ; B: Bloc de Sarrance ; C: Bloc de Lichançumendy ; D: bloc des Arbailles ; 1: étoiles rouges= Principaux « diapirs » de sel ; 2: Principaux chevauchements ; 3: failles importantes ; 4: Fossé flysch de Tardets-Sorholus ; 5: Bassin de Mauléon. Les flèches indiquent les directions de basculement (« tilt ») des blocs. D'après J. Canérot et F. Médiavila, BSGF, Earth sciences bulletin 2023, 194, 4, The mid-albian unconformity, a key to understand the geodynamics of the Northern Pyrenean Trough.



Coupes géologiques sériées montrant la géométrie du bassin de Mauléon (et son remplissage sédimentaire) et son extension vers les chaînons béarnais. D'après J. Canérot et F. Médiavilla, BSGF, Earth sciences bulletin 2023, 194, 4, The mid-albian unconformity, a key to understand the geodynamics of the Northern Pyrenean Trough



Carte géologique de la Zone Nord Pyrénéenne (avec le bassin de Mauléon et les chaînons béarnais) et une partie du bassin d'Arzacq. Les points rouges correspondent à la grille des mesures d' H_2 dans les sols. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022

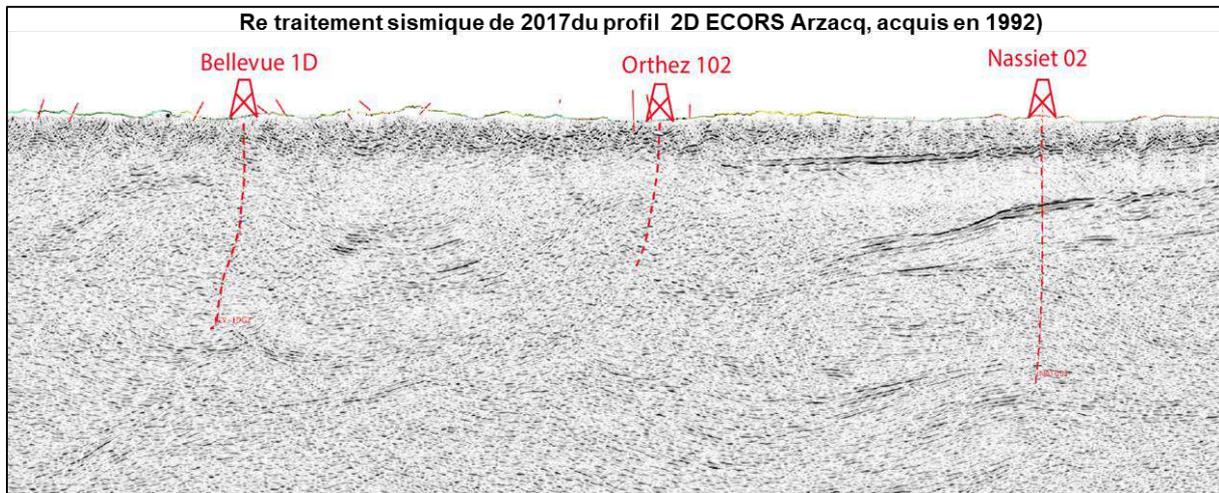
Les données sismiques et forages anciens de l'exploration pétrolière (1960- 1990)

Les données sismiques et leurs interprétations, ainsi que les données des forages, sont indispensables pour une évaluation efficace de ce bassin. Il faut espérer que les opérateurs des Permis Exclusifs de Recherche dans ce secteur ont pu avoir accès à ces données.

Sismique 2 D/3D

Le bassin de Mauléon est couvert par une grille irrégulière de sismique 2D ancienne (années 60 à 80) acquises en diverses campagnes au cours du temps, par la SNPA, puis Elf. La partie sud de la

sismique 3D centrée sur le gisement de gaz de Lacq, couvre une petite partie du bassin de Mauléon. Mais à Géol Pyr nous n'avons pas accès à ces données sismiques. Dans un tel contexte tectonique compliqué la sismique 2D et même 3D, a de sérieuses difficultés pour imaginer des structures complexes. Par définition, il est quasiment impossible de restituer des couches verticales, à cause des trajets sismiques, même avec des « offsets » très longs (6 km pour le profil sismique Ecors Arzacq).



Exemple de section sismique, profil Ecors d'Arzacq, passant dans le bassin de Mauléon avec les trajectoires de 3 puits, dont Bellevue-1D. Section acquise en 1992 et retraitée en 2017. Malgré ce retraitement, la qualité sismique reste très médiocre. Si vous ne voyez pas grand-chose, ne vous inquiétez pas, vous n'êtes pas le seul, y compris des géophysiciens ! D'après S. Calassou et al, Native H₂ seeps in the NW Pyrénées. An active mantle reactor factory ? Présentation RST, Lille, 2018.

Données de forages

Les données de forages sont cruciales pour une bonne compréhension de ce bassin. Au total une dizaine de forages d'exploration ont été réalisés par la SNPA, puis elf dans cette zone. Certains puits comportent des carottes sur les niveaux réservoirs ; ces carottes étant stockées à la carothèque de Bousens à côté de St Gaudens. A Géol Pyr nous n'avons pas accès aux données de ces forages et il faut se contenter d'informations indirectes, comme les trajectoires des puits mentionnées sur des coupes géologiques publiées dans divers articles scientifiques. Les données des puits sont accessibles au public, via la base Minergies (cf. rubrique pour aller plus loin en fin de module). Bon courage ..

Les puits de la zone (par ordre alphabétique) :

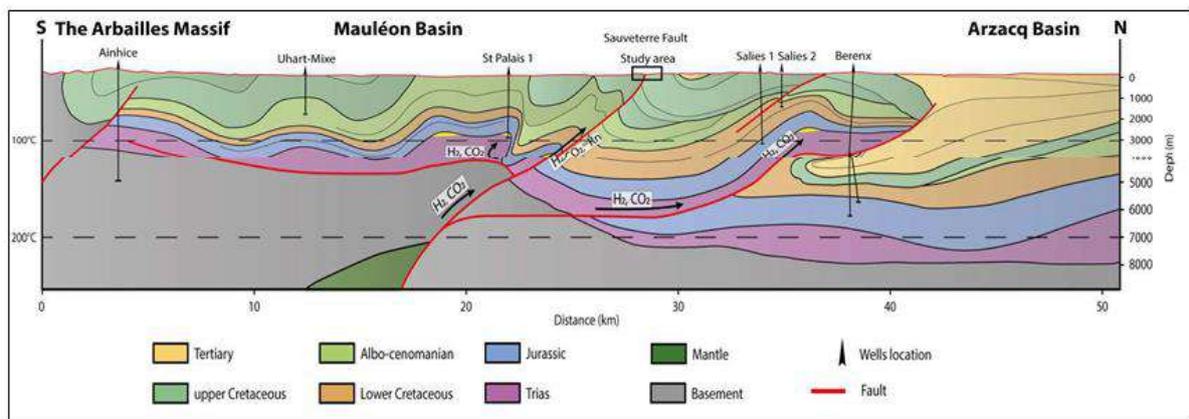
- Ainhice -1 : TD 3540 m, puits ayant atteint le socle paléozoïque, anticlinal faillé ?
- Bérenx-1 et 2 : le flanc nord de l'anticlinal de Bérenx a été traversé deux fois par les forages de Bérenx -1 et 2, opérés par Esso. Ces deux puits ont prouvé qu'il s'agit d'un anticlinal chevauchant. Le flanc sud de cet anticlinal a été reconnu par les puits de Salies-1 et 2.
- Bellevue-1D: D pour Dévié, TD 6909 m, record français de profondeur et de coût ; a coûté 207 millions de francs de l'époque (1993) ce qui correspondrait à 52 Millions d'€ de nos jours. C'est le dernier puits foré dans ce secteur. Ce puits illustre très bien les difficultés de l'exploration dans ce contexte géologique de Piémont des Pyrénées. Cf. paragraphe page suivante.
- Chéraute-1 : objectif = structure au dessus du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen.
- Hasparren -101 : socle granitique atteint.
- Les Cassières-2 : objectif au dessus du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen, dans l'unité de Saint Palais.
- Orthez -102 : TD 5489 m, objectif au dessus du chevauchement de Ste Suzanne.
- Salies 1 et 2 : ces puits ont reconnu le flanc sud de l'anticlinal de Bérenx, et ont traversé des évaporites du Trias, lequel affleure d'ailleurs abondamment juste au nord. Il n'y a pas de diapir

de sel à Salies, mais une lame de sel inter-stratifiée dans des niveaux du Crétacé sup et recoupée par les forages de Salies 1 et 2.

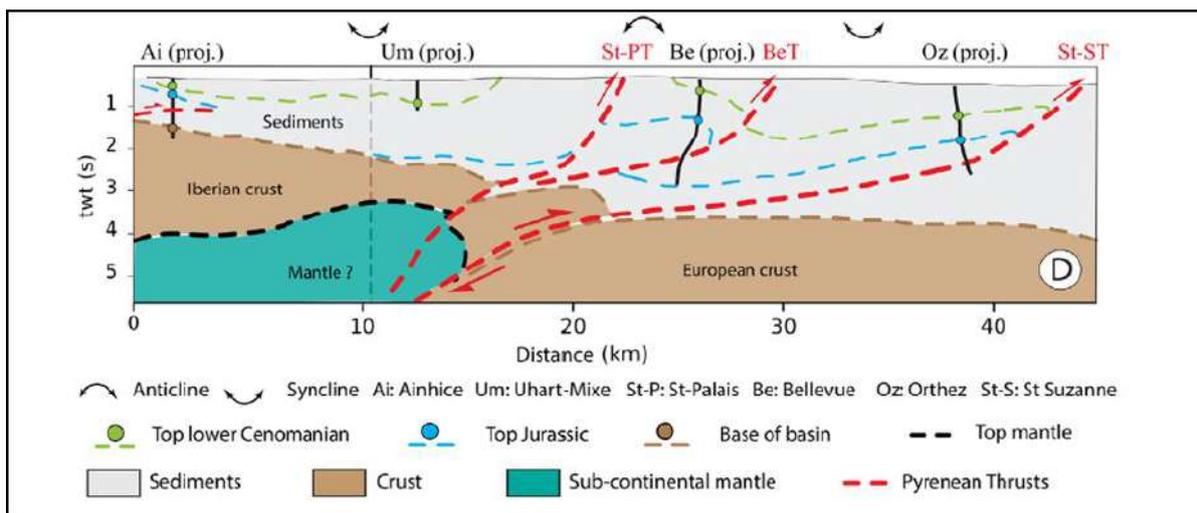
- Saint Palais -1 : sur structure salifère ?
- Uhart Mixe-1 : TD 1868 m, anticlinal classique dans le Crétacé ?

On a relevé plusieurs incohérences entre certaines coupes géologique dans les publications scientifiques récentes et la réalité des relevés de terrains (anciens des années 70, mais bien argumentés) et les données des puits. Espérons que les nouveaux explorateurs pour l'hydrogène sauront intégrer ces données anciennes, mais incontournables, dans leur rapproche d'exploration.

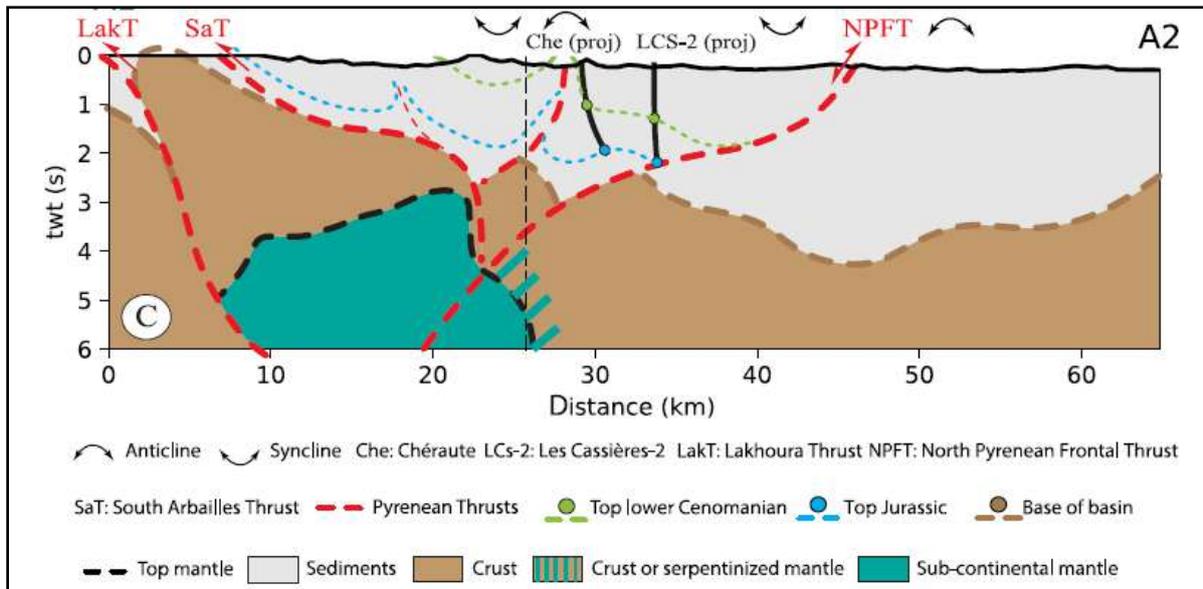
Les coupes géologiques suivantes, montrent la localisation des puits mentionnés ci-dessus et le type d'objectif qu'ils sont allés reconnaître en profondeur.



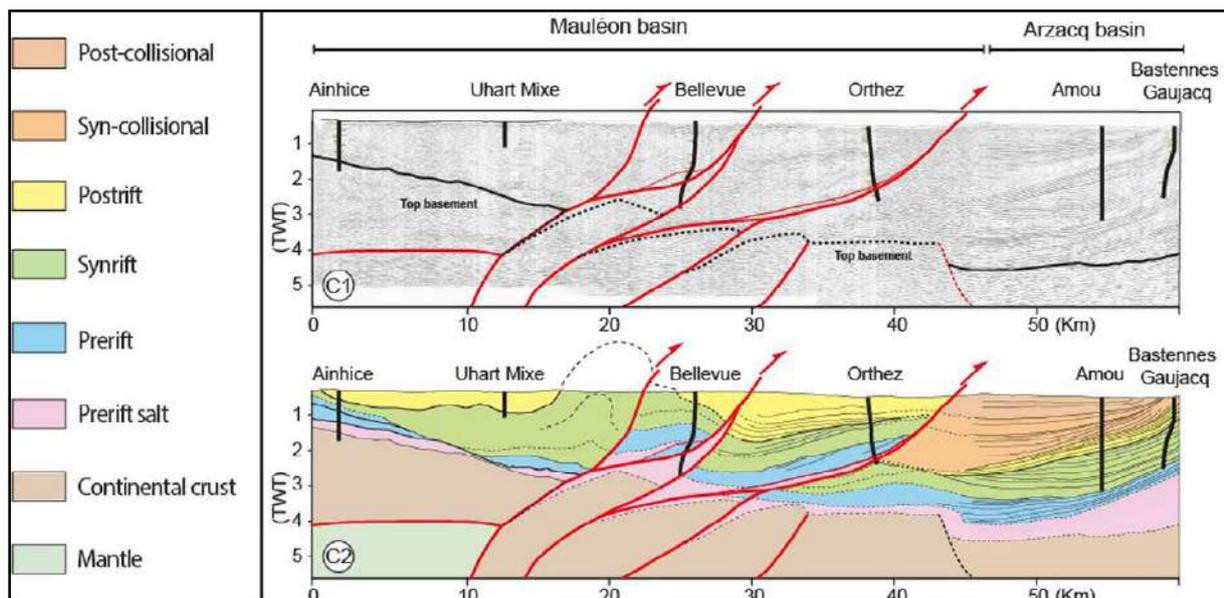
Coupe géologique NS à travers le bassin de Mauléon et la partie sud du bassin d'Arzacq, montrant la position de certains puits et les objectifs et structures qu'ils sont allés explorer. Remarquer que les évaporites du Trias sont impliquées dans la tectonique pyrénéenne et se trouveraient à moins de 5000 m dans la partie sud du bassin de Mauléon, mais à 7000 m dans la partie nord de ce même bassin. Noter que la structure de Salies ne ressemble en rien à un diapir classique. D'après section de G. Zolnai, 1973, et modifiée par Saspiturry et al, 2019.



Section sismique NS, habillée en géologie à travers la partie Ouest du le bassin de Mauléon, montrant la position de certains puits et les objectifs et structures qu'ils sont allés explorer. Abbreviations : Ai: Ainhice; Am: Amou; Be:Bellevue; Oz: Orthez; Um: Uhart-Mixe; Ce: Cheraute; Lc: Les Cassières; GR: Grand Rieu High BSGF - Earth Sciences Bulletin 2021, 192, 47, M. Lehujeur et al., Published by EDP Sciences 2021

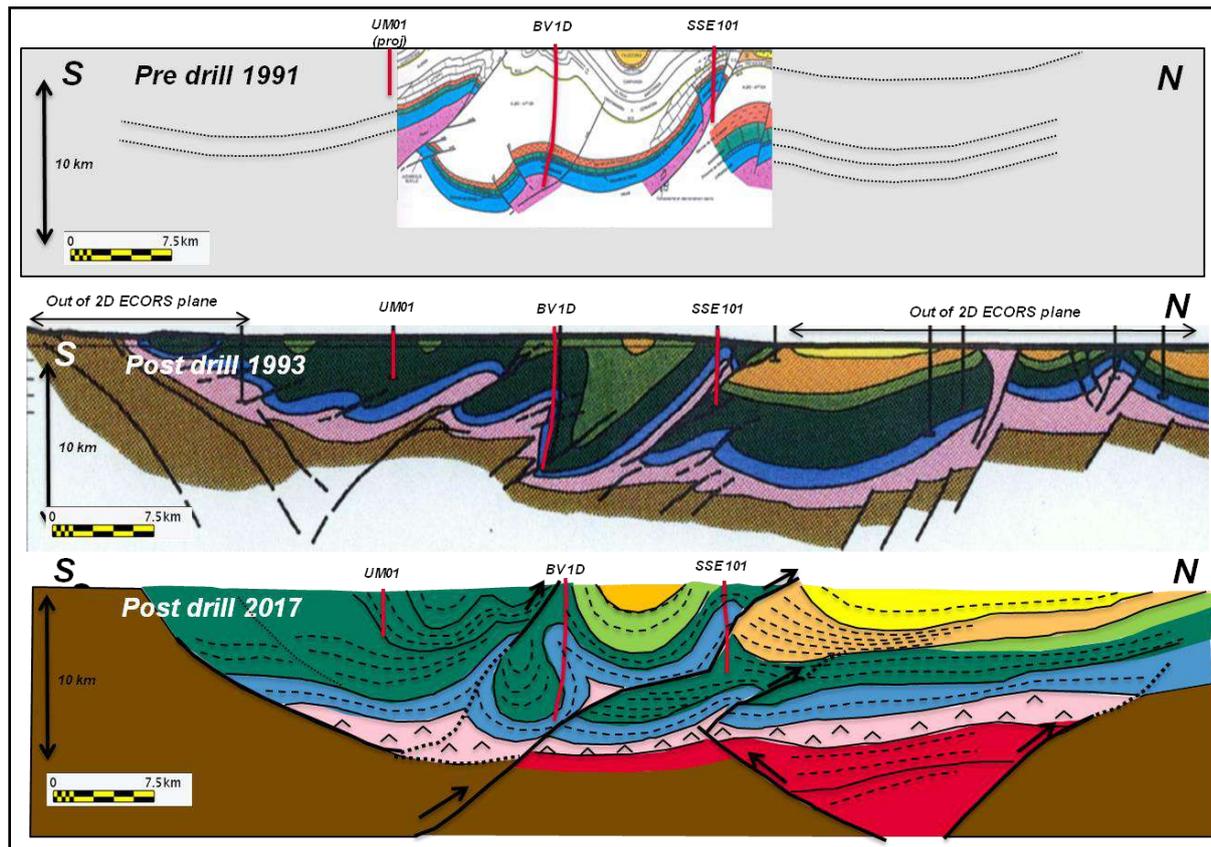


Section sismique NS, habillée en géologie à travers la partie est du le bassin de Mauléon, montrant la position de certains puits et les objectifs et structures qu'ils sont allés explorer. Cheraute-1 et Les Cassières-2 testant des structures au -dessus du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen. Abréviations : Ai: Ainhice; Am: Amou; Be :Bellevue; Oz: Orthez; Um: Uhart-Mixe; Ce: Cheraute; Lc: Les Cassières; GR: Grand Rieu High. BSGF - Earth Sciences Bulletin 2021, 192, 47, M. Lehujeur et al., Published by EDP Sciences 2021



Coupe géologique à travers le bassin de Mauléon, basée sur l'interprétation d'une section sismique (attention les échelles verticales sont en temps, en secondes (Two Way Time), et non pas en profondeur, en mètres. Les trajectoires de quelques forages pétroliers sont mentionnées. L'interprétation du puits de Bellevue -1 est en partie fausse, car ce puits a traversé 3500 m d'un flanc sub-vertical composé de Barrémien et n'a donc pas pénétré autant de sel comme indiqué sur cette coupe ! cf. paragraphe page suivante. D'après Saspiturry et al., 2019.

Le cas d'école du du puits de Bellevue-1D, pour illustrer les limites de l'imagerie sismique



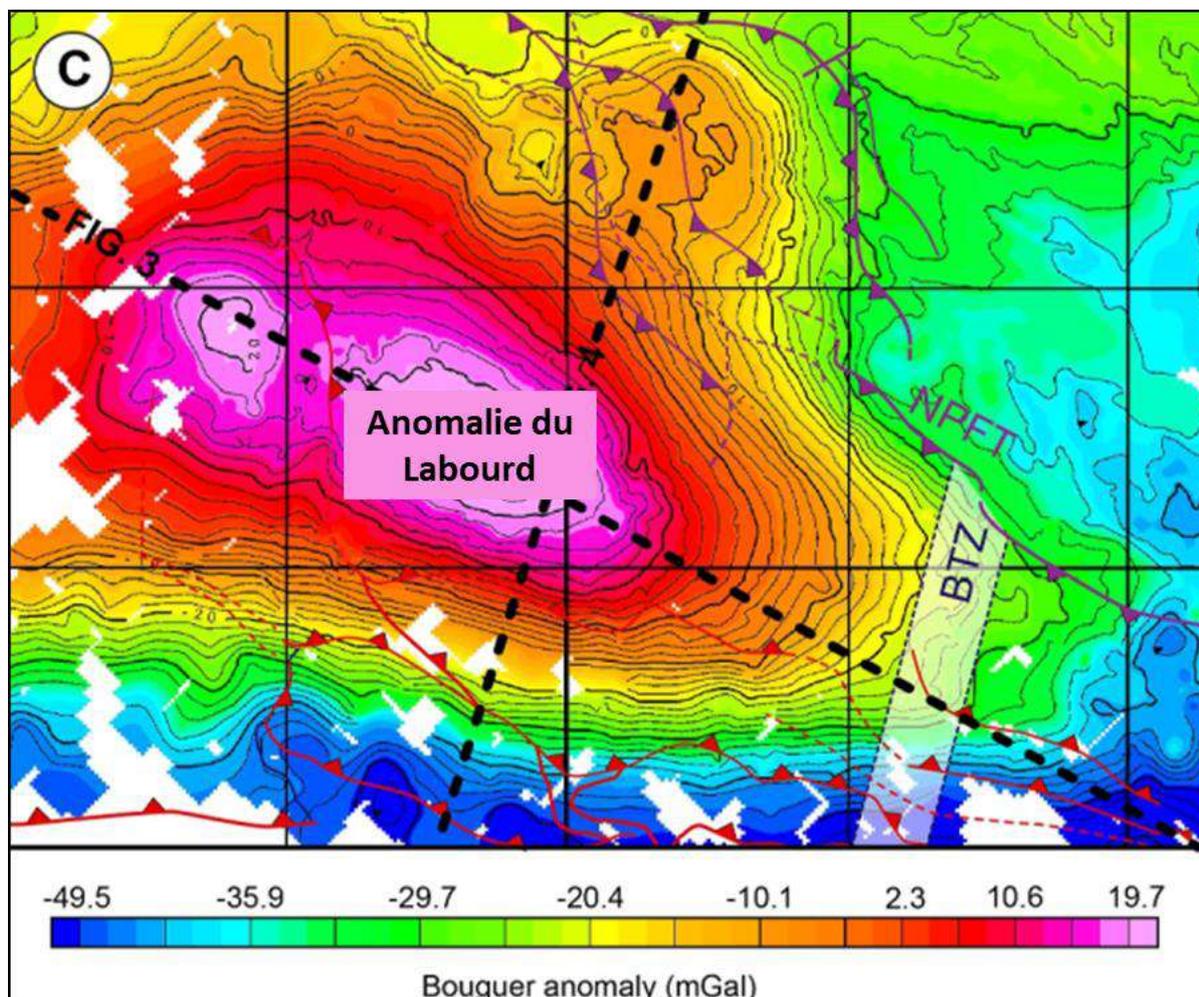
Coupes montrant l'évolution des interprétations de Bellevue-1D, avant forage, en fin de forage (en 1993) et après retraitement sismique en 2017, en utilisant le profil sismique Ecors d'Arzacq. D'après Extrait de *Retraitements sismiques 2017 dans le cadre du projet de recherche « Orogen », Nouvelle approche structurale possible de l'objet Bellevue*, JJ. Biteau, H. Puntious, Conf. SGF, 2019.

Les coupes ci-dessus montrent bien l'évolution des idées et des interprétations concernant le prospect de Bellevue. Ce prospect identifié depuis longtemps, était sujet à diverses interprétations: anticlinal faillé, ou bloc basculé et érodé à la façon du gisement de Meillon. Malgré des risques élevés, le manque de visibilité sismique, la grande profondeur, mais aussi la possibilité de trouver un "petit Lacq", le forage a été entrepris et a duré 3 ans à cause de nombreux problèmes techniques de forage (TD 6 909 m atteinte en 1993). Le forage par Bellevue-1D d'un pli à flanc court sub-vertical est bien confirmé par le travail sismique de 2017 (retraitement du profil Ecors Arzacq passant par Bellevue), mais la question de la vergence du pli et celle de son ancrage en profondeur n'est toujours pas réglée. La coupe inférieure illustre l'option de la vergence sud à l'inverse de l'interprétation de fin de forage. A noter l'implication du sel dans les chevauchements et la profondeur guère atteignable par forage, des éventuels pièges sous le sel pour l'hydrogène.

6-3-2 La roche source de l'hydrogène : approche géophysique

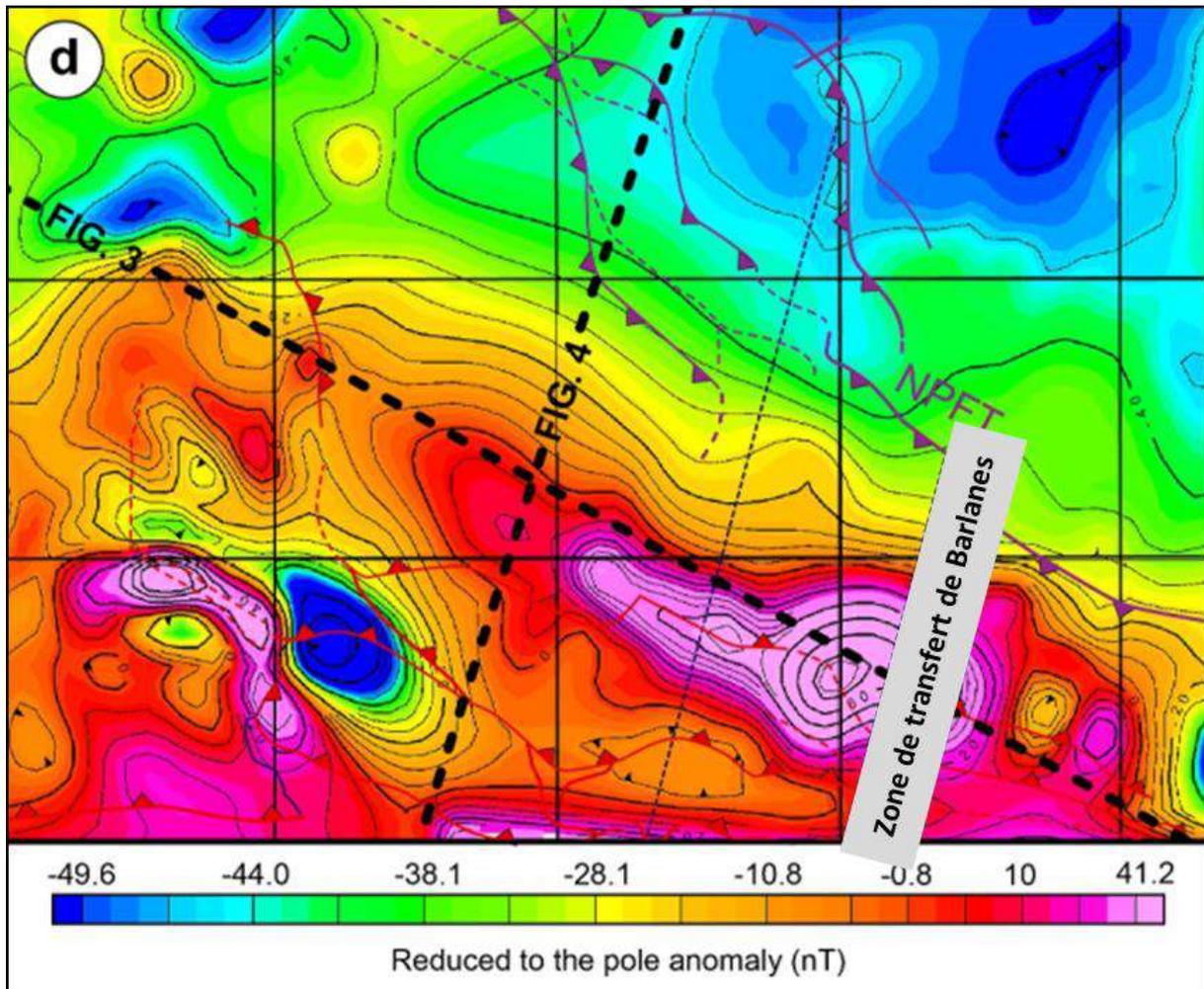
Plusieurs études des données issues des méthodes géophysiques, ont révélé des caractéristiques intéressantes sur la structure profonde de cette partie ouest des Pyrénées par traitement des données gravimétriques, magnétiques et sismiques.

Premièrement, une forte anomalie positive de Bouguer ($> +20$ milliGal) est observée sous le bassin de Mauléon. Cette anomalie positive de gravimétrie est interprétée comme due à la présence de matériau dense, à une profondeur relativement faible, constituée de croûte inférieure ou de manteau.



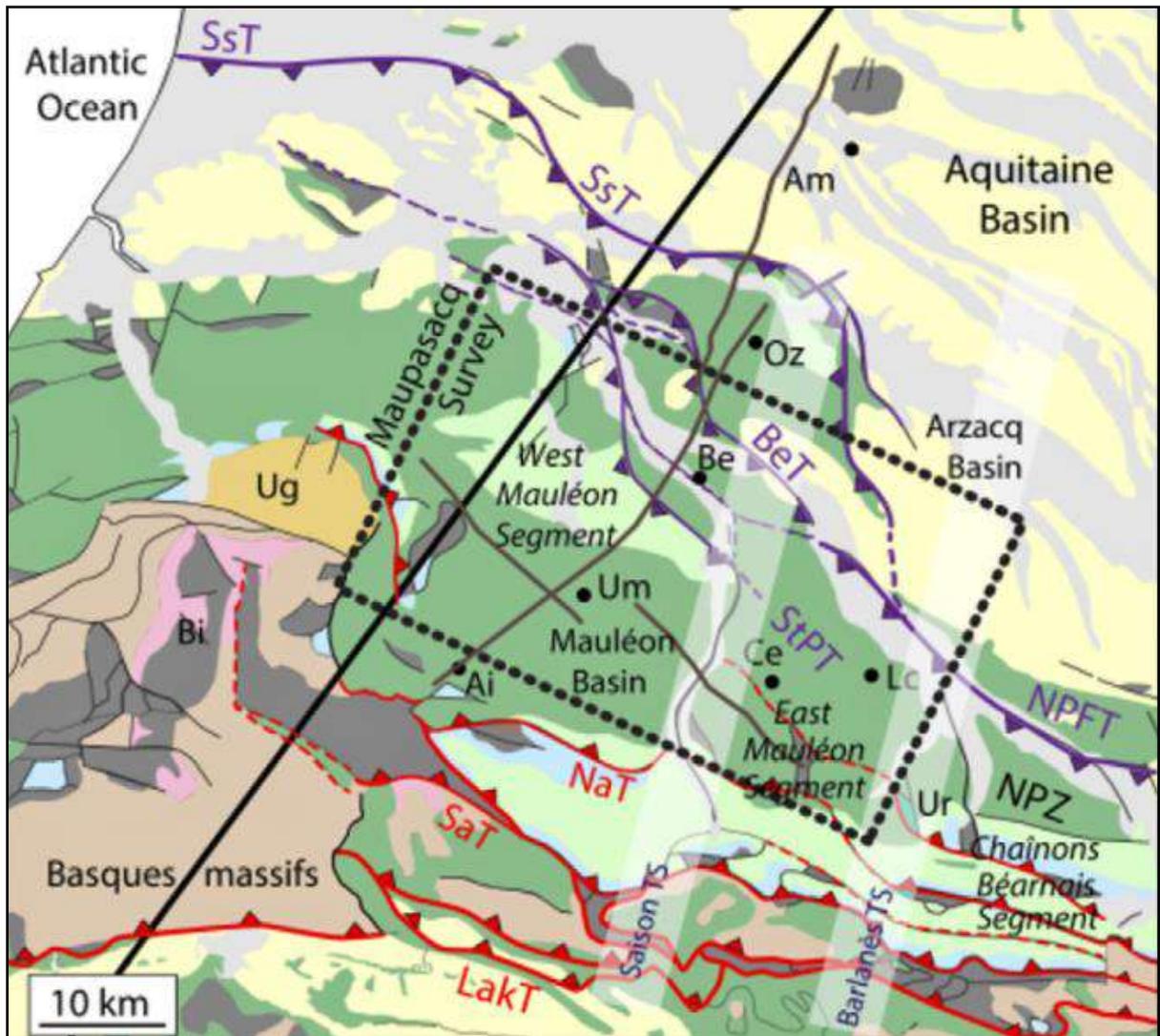
Anomalie de Bouguer, montrant une forte anomalie gravimétrique appelée classiquement anomalie du Labourd, et centrée sur le bassin de Mauléon. BTZ = Zone Transformante de Barlanès D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution in a Hyperextended Rift Suture: Implication for Natural Hydrogen Exploration (Mauléon Basin, Pyrenees)*. *Tectonics*, 2024, 43 (8),

Deuxièmement, une anomalie significative magnétique positive (> 60 nanoTesla) est aussi localisée juste sous le bassin de Mauléon. Cette anomalie magnétique se corrèle bien, mais avec un décalage vers le SE, avec l'anomalie de Bouguer mentionnée précédemment, fournissant des informations cruciales sur la nature des roches du manteau ; car la susceptibilité magnétique pourrait être corrélée au degré de serpentinisation. Des roches ultra-mafiques, comme celles constituant le manteau lithosphérique acquièrent un magnétisme induit, secondaire, durant la réaction de serpentinisation et la formation de magnétite associée.

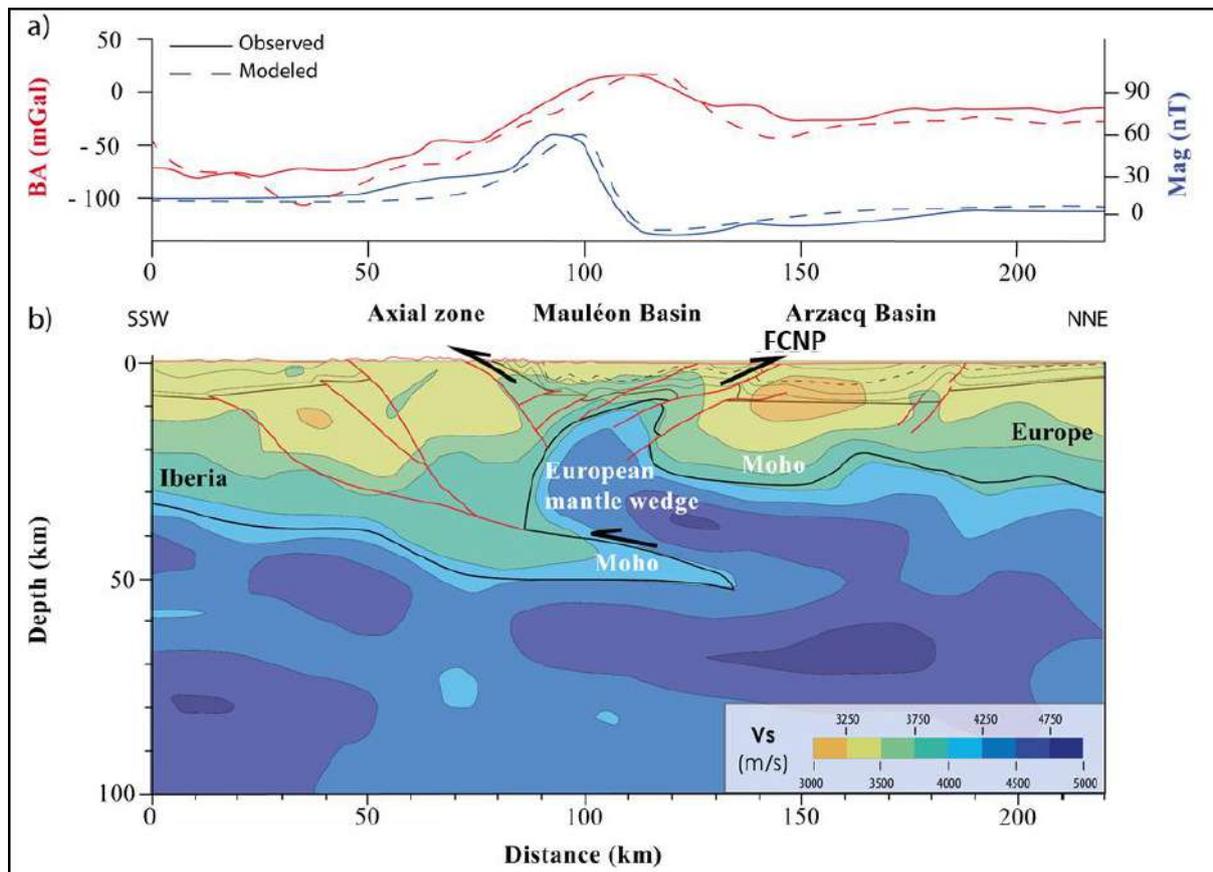


Anomalie magnétique positive réduite au pôle, centrée sur la zone de transfert tectonique de Barlanès dans le SE du bassin de Mauléon. Cette anomalie peut être en relation avec la magnétisation induite par le serpentinitisation. D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution in a Hyperextended Rift Suture: Implication for Natural Hydrogen Exploration (Mauléon Basin, Pyrenees)*. *Tectonics*, 2024, 43 (8),

Troisièmement, des vitesses sismiques élevées (V_p , vitesses des ondes de compression d'environ 7.3 km/s, V_s vitesse des ondes de cisaillement d'environ 4.2 km/s) ont été calculées à partir d'un processus d'inversion sismique, à partir d'une campagne de sismique passive dite « Maupasacq survey », sous la partie ouest du bassin de Mauléon et sont attribuées à un corps de manteau serpentinitisé, anciennement exhumé au fond de l'ancien rift albien, et localisé à des profondeurs de 8 à 10 km .



Carte montrant le contexte géologique, les principales failles (en bleu les failles à vergence nord et en rouge celles à vergence sud), l'acquisition de sismique passive et la localisation de la coupe suivante (profil mag, gravité et vitesses sismique). D'après N. Lejuheur et al, BSGF192,, 2021

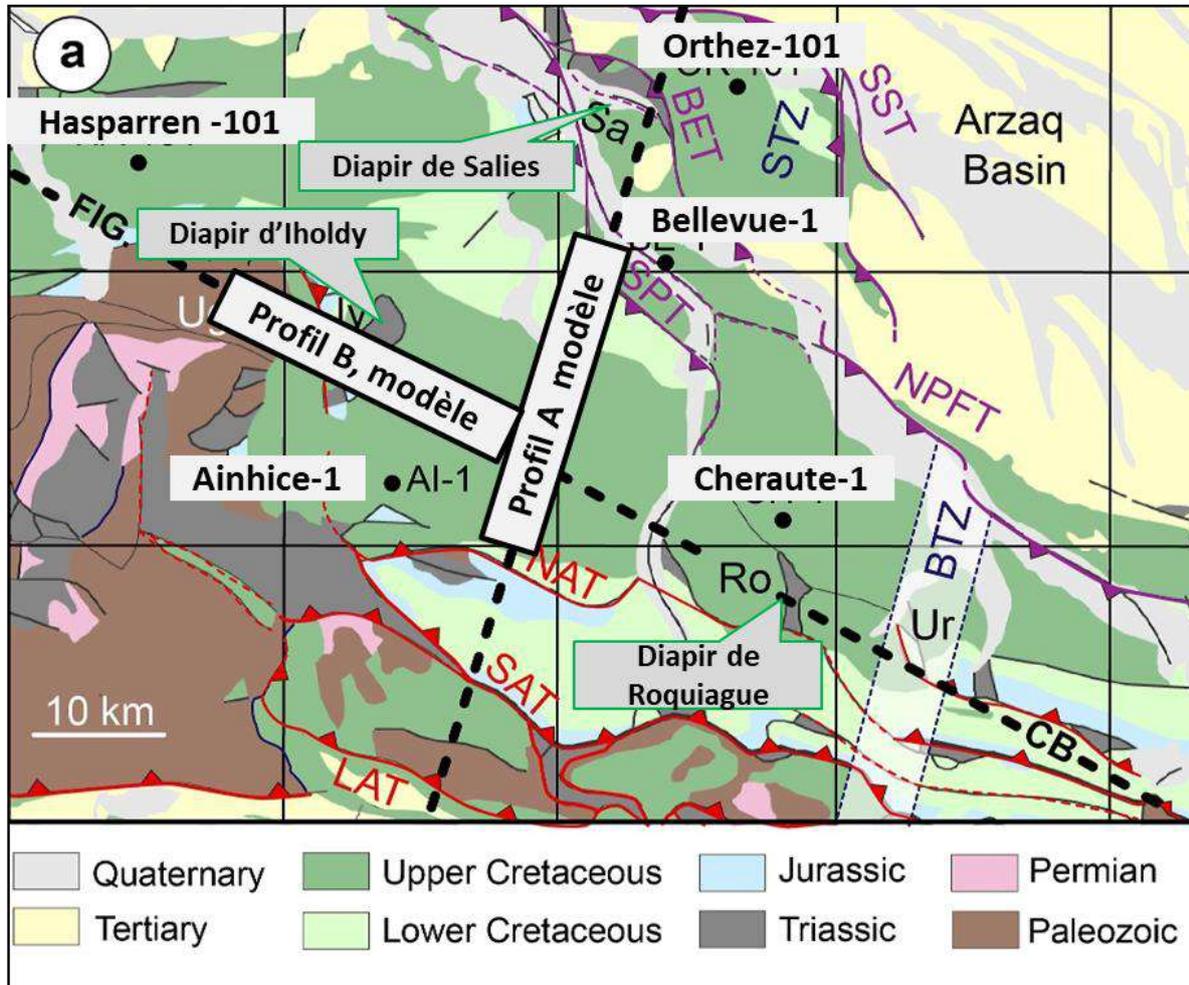


Coupe à travers le bassin de Mauléon. Cf. carte précédente pour la localisation. Profil gravimétrique et magnétique selon cette coupe. D'après Garcia-Senz et al, 2019. Coupe obtenue par inversion sismique montrant les vitesses sismiques (Vs). D'après Wang et al, 2016 et FCNP = Front de Chevauchement Nord Pyrénéen.

Par conséquent, la combinaison de toutes ces données indiquent la présence d'une roche source potentielle pour l'hydrogène par serpentinisation des roches du manteau et l'existence de conduits préférentiels pour la migration des fluides, ce qui conduit à considérer la partie nord du piémont pyrénéen et en particulier le bassin de Mauléon, comme un environnement prometteur pour l'exploration de l'hydrogène natif.

6-3-3 Modélisation 2D gravi-mag pour l'évaluation du degré de serpentinisation et de la fenêtre de températures favorable à cette serpentinisation.

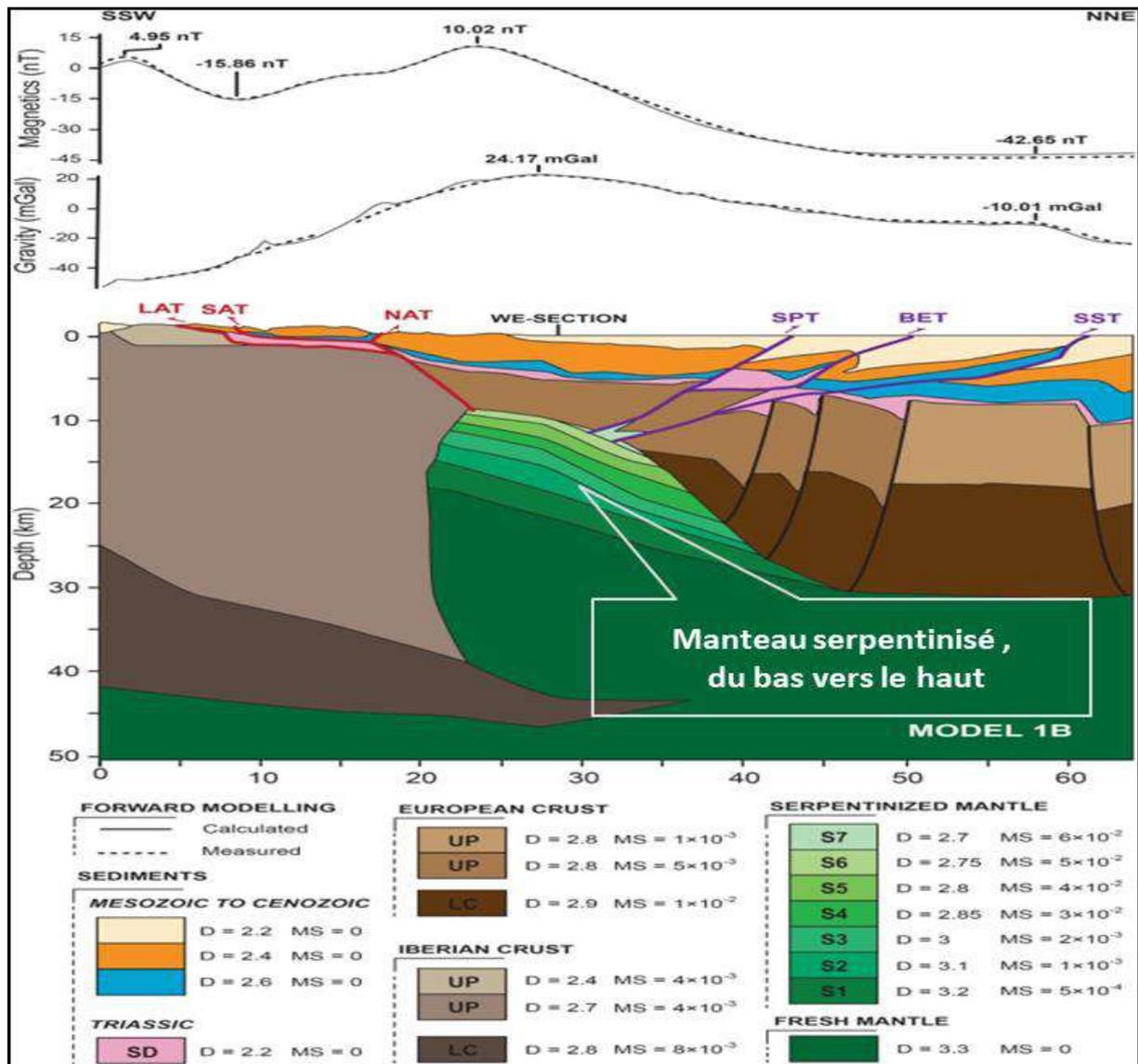
La distribution géographique et la quantification de la serpentinisation n'avait jusqu'à présent guère été étudiée, alors que cet aspect est déterminant pour l'exploration de l'H₂. Des modélisations combinant toutes les données disponibles (gravi, mag, sismique, puits) ont été réalisées suivant 2 profils dans le bassin de Mauléon. Plusieurs modèles sont proposés, mais nous nous restreindrons aux résultats principaux. Pour plus de détails, aller à la rubrique « pour aller plus loin ».



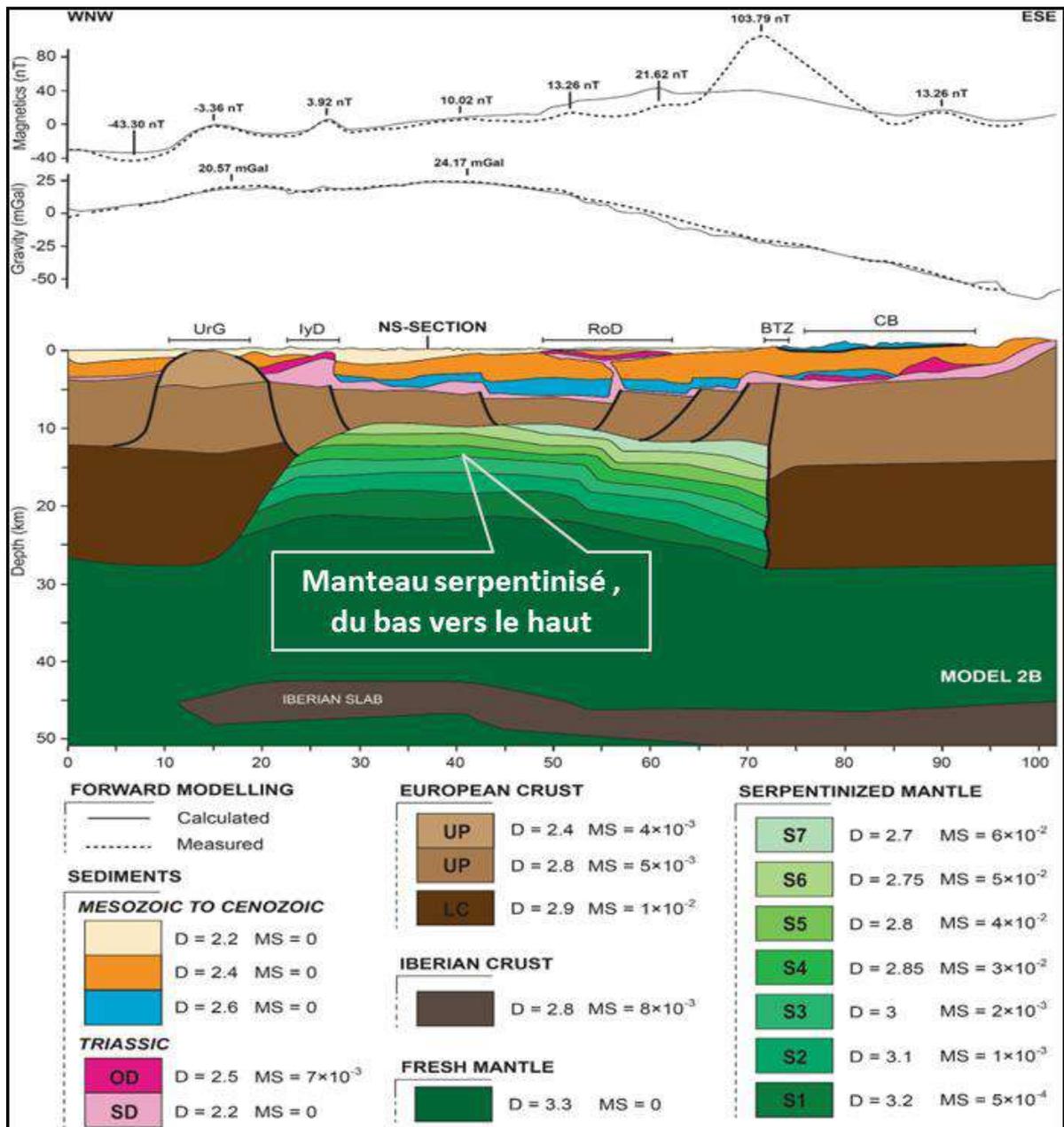
Localisation des 2 profils A et B ayant fait l'objet de modélisation géophysiques dans le bassin de Mauléon. BTA = Zone Transformante de Barlanès. D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution in a Hyperextended Rift Suture: Implication for Natural Hydrogen Exploration (Mauléon Basin, Pyrenees)*. *Tectonics*, 2024, 43 (8),

Ces modélisations montreraient que le corps de péridotites sous le bassin de Mauléon serait à environ 8 km de profondeur. Les résultats de ces modélisations, montrent que le degré de la serpentinisation augmente du bas (20 km de profondeur) vers le top du manteau, pour atteindre un maximum de 76 % de serpentinisation.

Le profil NS montre que le front de serpentinisation est pentée vers le nord, suggérant un gradient de serpentinisation NS responsable des anomalies gravimétriques et magnétiques. Cette orientation est compatible avec le détachement existant dans le domaine en hyper-extension qui a exhumé le manteau durant le fonctionnement du rift créacé. Le profil EW montre aussi que la serpentinisation augmente vers l'est, et atteint son maximum contre la zone transformante de Barlanès.



Modélisation 2D gravi-mag le long d'un profil SSW-NNE (cf. carte page précédente pour sa localisation). Ce modèle 1B a pour but de tester l'hypothèse d'un manteau serpentinisé du bas vers le haut (parmi d'autres modèles testant des hypothèses différentes), ce qui démontrerait indirectement des apports d'eaux météoriques à ces profondeurs ? Légende. S1 à S7 : fronts de serpentinisation, UP : Upper Crust (= croûte supérieure), LC : Lower Crust (= croûte inférieure), OD : Ophite Dominated triassic (Trias à dominante d'ophite), SD : Salt Dominated Triassic (Trias à dominante salifère), LAT : LAKhoura Thrust, SAT : South Arbailles Thrust, NAT : North Arbailles Thrust, SPT Saint Palais Thrust, BET Bellevue Thrust, SST Saint Suzanne Thrust. D'après Nicolas Saspiturry et al, *Tectonics*, 2024, 43 (8),



Modélisation 2D gravi-mag le long d'un profil SSW-NNE (cf. carte page précédente pour sa localisation). Ce modèle 1B a pour but de tester l'hypothèse d'un manteau serpentinisé du bas vers le haut (parmi d'autres modèles testant des hypothèses différentes). Légende. S1 à S7 : fronts de serpentinisation, UP : Upper Crust (= croûte supérieure), LC : Lower Crust (= croûte inférieure), OD : Ophite Dominated triassic (Trias à dominante d'ophite), SD : Salt Dominated Triassic (Trias à dominante salifère), LAT : LAKhoura Thrust, SAT : South Arbailles Thrust, NAT : North Arbailles Thrust, SPT : Saint Palais Thrust, BET : Bellevue Thrust, SST : Saint Suzanne Thrust.

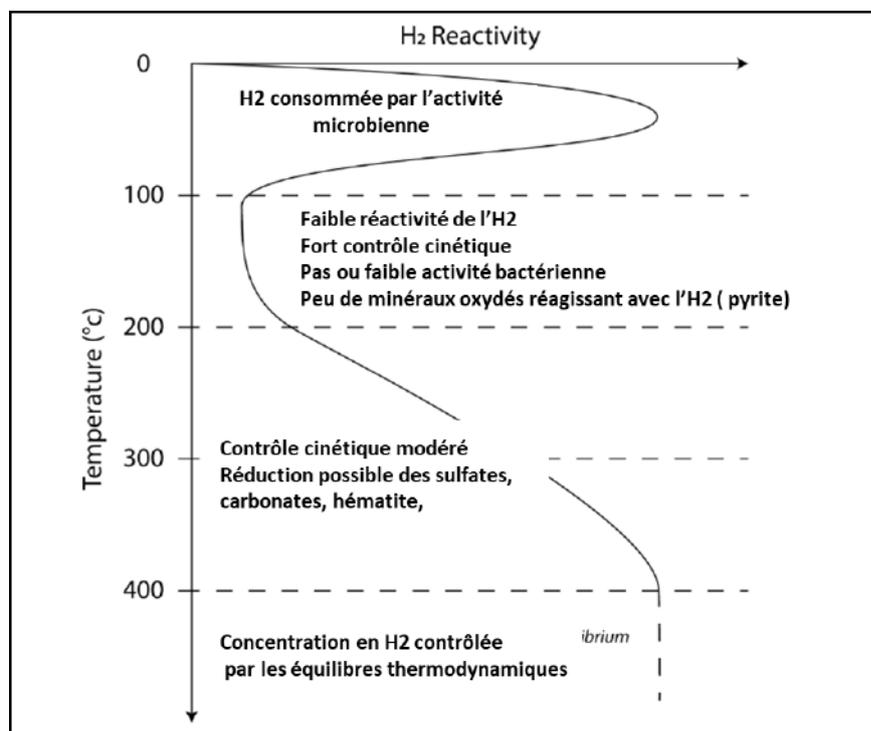
La géométrie du soi-disant diapir de Rodiaque (« Rod » sur la coupe) est irréaliste. De même, le soi-disant diapir d'Iholdy (« IyD » sur la coupe) correspond au Trias de Méharin à l'affleurement, et est interprété comme étant une lame de Trias re-sédimentée (J. Henry et Zolnai, 1971). D'après Nicolas Saspiturry et al, *Tectonics*, 2024, 43 (8),

Conditions de température pour une serpentinisation optimale et génération d'H₂ et à la conservation de l'H₂ dans les pièges.

Nous avons vu précédemment que la génération d'hydrogène augmente fortement dans la fourchette de températures 200 à 310 °C, alors qu'elle décroît fortement à des températures plus basses ou plus hautes. Les modélisations basées sur un gradient géothermique actuel de 25° + ou -

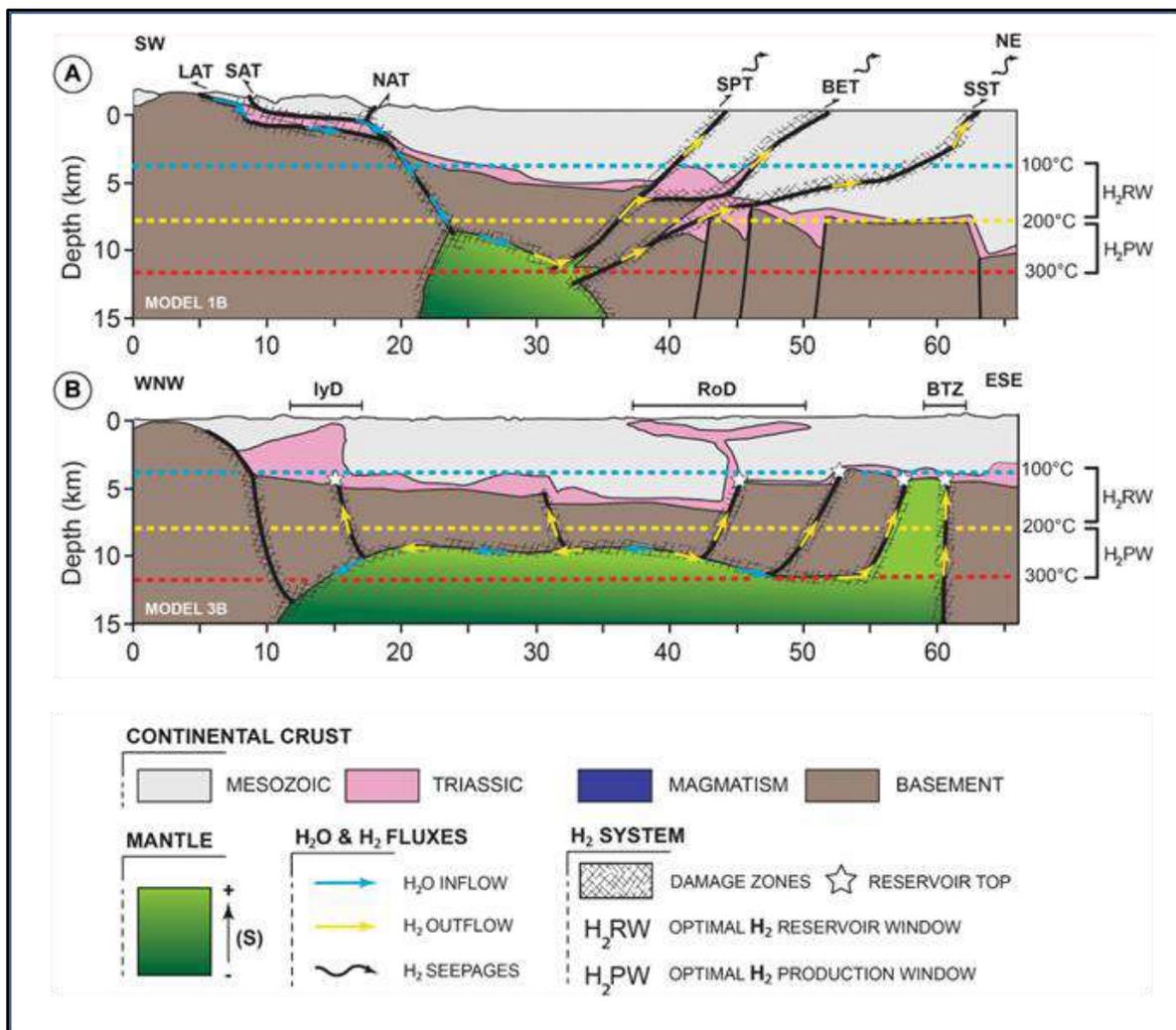
2.7°C, calculé à partir des mesures de température dans les anciens puits pétroliers, montrent que l'isotherme 100 °C est atteint vers 3700 m de profondeur, l'isotherme 200 °C vers 7700 m et l'isotherme 300 ° vers 11 600 m.

Les modélisations montrent qu'une partie du manteau de 2.5 à 4 km d'épaisseur est comprise dans cette fourchette de température 200-300°C. Cette fenêtre de températures correspond à un degré de serpentinisation déjà atteint de 36 à 76 %, ce qui peut paraître élevé. Mais même si un degré de serpentinisation atteint jusqu'à présent, est relativement élevé, il reste encore un volume significatif d'hydrogène pouvant être généré si le manteau continue d'être serpentinisé.



Estimation qualitative de la réactivité de l'hydrogène en fonction de la température des milieux géologiques. D'après N Lefevre, thèse Grenoble, 2022

Les objectifs potentiels pour piéger l' H_2 (roches du socle fracturées ou grès/dolomies du Trias inf/moyen, sous une épaisse couverture étanche d'évaporites du Trias sup) se trouvent dans la fenêtre optimale de 200-100 °C pour que l' H_2 retenu dans ces pièges ne soit pas dégradé ou consommé par des réactions chimiques avec des minéraux ou par une activité bactérienne. Par contre, ces objectifs se trouvent à des profondeurs importantes d'environ 5000 à 6000 m, voire plus, de profondeur, ce qui laisse présager des coûts de forages d'exploration très importants pour aller tester cette interprétation.



Modèle conceptuel pour la fenêtre des températures optimales pour la génération d'hydrogène à partir du manteau en partie serpentinisé et aussi des conditions températures optimales pour la préservation de l'hydrogène dans les réservoirs potentiels dans le socle ou Trias inf/moyen surmontés par les épaisses formations d'évaporites du Trias sup. La partie supérieure du manteau est bien située dans la fenêtre optimale 300-200°C et les réservoirs potentiels (sous le sel) sont bien situés dans la fenêtre 200- 100 °C. Légende. (S): serpentinization amount, Thrust faults: LAT Lakhoura, SAT South Arbailles, NAT North Arbailles, SPT Saint-Palais, BET Bellevue, SST Sainte-Suzanne. Transfer zones: ITZ Iholdy, STZ Saison, BTZ Barlanes. BTZ: Barlanes transfer zone; IyD : Iholdy diapir; RoD : Roquiague diapir. Voir commentaires page précédentes 47, concernant les soi-disant diapirs de sel figurant sur cette coupe. D'après Nicolas Saspiturry et al, *Tectonics*, 2024, 43 (8),

Quel volume d'hydrogène produit par un km³ de péridotites en voie de serpentinisation ?

Des travaux expérimentaux (Mc Collom et al, 2016) ont essayé de quantifier le volume d'hydrogène produit en conditions standards de température et pression, c'est-à-dire 15°C et 1 atmosphère de pression) par serpentinisation sur de l'olivine broyée à 300 °C et 35 Méga Pascal de pression, avec un rapport eau/roche de 1.6-2.6. Le résultat serait de 182 BCF de d'H₂ par km³ et par an (BCF = Billion de cubic feet, soit en unités métriques 28.4 Millions de m³).

D'autres estimations (Klein et al, 2013) donneraient pour la serpentinisation d'une péridotite contenant 80 % d'olivine, seulement 0.9 Bcf /km³ de péridotites/an, mais à des températures de 200 °C et 50 Mpa de pression et avec un rapport eau/roche de 1.

Ces expérimentations montrent des résultats guère comparables quand on change les paramètres de température et de pression, avec des différences d'un facteur de 200 ! Mais ces résultats

démonstreraient la vitesse de serpentinisation et le volume final de production d'hydrogène dans des quantités commerciales.

D'autres simulations numériques (Zwaan et al 2025) suggèrent que la génération actuelle d'H₂, due à la serpentinisation du manteau à une profondeur d'environ 10 km, dans la zone du bassin de Mauléon dans les Pyrénées, générerait 600 000 t/an d'H₂. C'est l'équivalent des besoins en énergie par an d'une ville d'un demi-million d'habitants. En postulant des coûts de production de 1 \$/kg d'H₂ (à condition qu'il y ait des pièges à H₂ !) cela peut être considéré comme une source viable d'énergie.

Dans des conditions géologiques, la durée du phénomène de serpentinisation dépendra de l'efficacité de l'inter-action eau-roche, mais sa durée (évidemment en termes géologiques) serait relativement brève. La durée de la serpentinisation d'une marge passive serait entre 100 000 ans et 1 million d'années. D'où l'intérêt des modèles de serpentinisation dans le bassin de Mauléon pour évaluer le degré de serpentinisation actuel, et pour savoir s'il y a encore de l'H₂ à produire !

Quand la serpentinisation a-t-elle démarrée dans les Pyrénées ? Ce phénomène est-il continu ? Y-at-il eu des périodes d'arrêts ? (par manque d'alimentation en eau par exemple ?).

L'histoire géologique des Pyrénées peut nous fournir des informations utiles. On peut supposer que la serpentinisation a démarré (de façon hétérogène compte tenu du contexte géologique local) lors des derniers épisodes d'exhumation du manteau en fond de rift au cours de l'Albien sup. à terminal, mettant en contact le manteau encore chaud et les eaux marines. Ensuite, l'accumulation de grandes quantités de sédiments (flyschs Crétacé sup et Cénozoïque) pourraient avoir stoppé le processus de serpentinisation. Lors de la phase compressive pyrénéenne (- 83 à -20 Ma) le manteau localement a été remonté « tectoniquement » vers – 10 km de profondeur. Mais les failles de chevauchement jouant en compression ne sont pas forcément efficaces pour favoriser les infiltrations des eaux météoriques en grande profondeur. Ce n'est qu'après -20 Ma, que le relâchement des contraintes tectoniques font que les failles jouent à nouveau en extension (ce qu'indiquent les mécanismes au foyer des séismes actuels) et favoriseraient la pénétration des eaux météoriques en grande profondeur et pas là, aussi le processus de serpentinisation.

Par comparaison dans le système pétrolier, les modèles utilisant le logiciel Kinex, donneraient une production de méthane de 4.8×10^{-3} Bcf (milliards de pieds cubes) par km³ de roche et par an, expulsée à partir d'une roche mère avec les caractéristiques suivantes : Total Organic Carbone 5%, kérogène de type mixte II/III, température de 180 °C). La quantité de méthane produite par Km³ de roche mère et par an serait de l'ordre de 1000 fois moindre que pour l'H₂ ! Avantage au système hydrogène en termes d'efficacité et de rapidité.

6-3-4 Rôle des chevauchements : apports d'eau, indispensable à la serpentinisation et chemins de migration de l'hydrogène vers la surface ?

Pour qu'un système hydrogène puisse fonctionner, l'apport d'eau en continu pour alimenter la serpentinisation des péridodites qui génère l'hydrogène, est un paramètre crucial à prendre en compte. A noter que ce paramètre est évidemment inconnu dans le système pétrolier.

Le contexte structural de piémont ou de l'avant pays d'un orogène est à priori favorable à l'infiltration de grandes quantités d'eaux météoriques, par la vaste surface de la zone d'infiltration, par la nature karstique de certaines formations, par les forts pendages des couches géologiques, par la présence de systèmes de failles à fort pendages et profondes, allant s'enraciner au coeur de l'orogène ; le tout favorisé par un fort gradient hydraulique imposé par l'altitude de la chaîne de montagnes et en particulier le massif des Arbailles à 700 m d'altitude, ce qui provoque plusieurs milliers de mètres de gradient vertical.

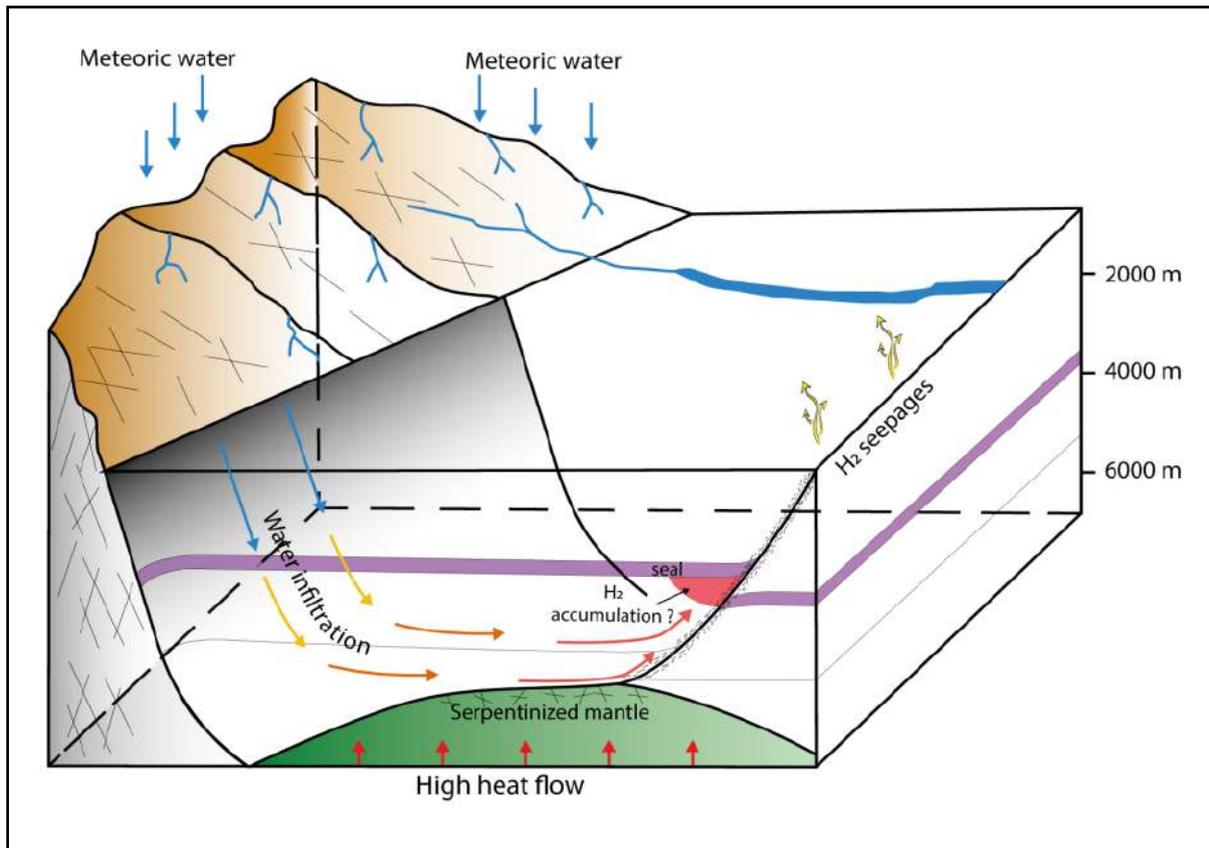
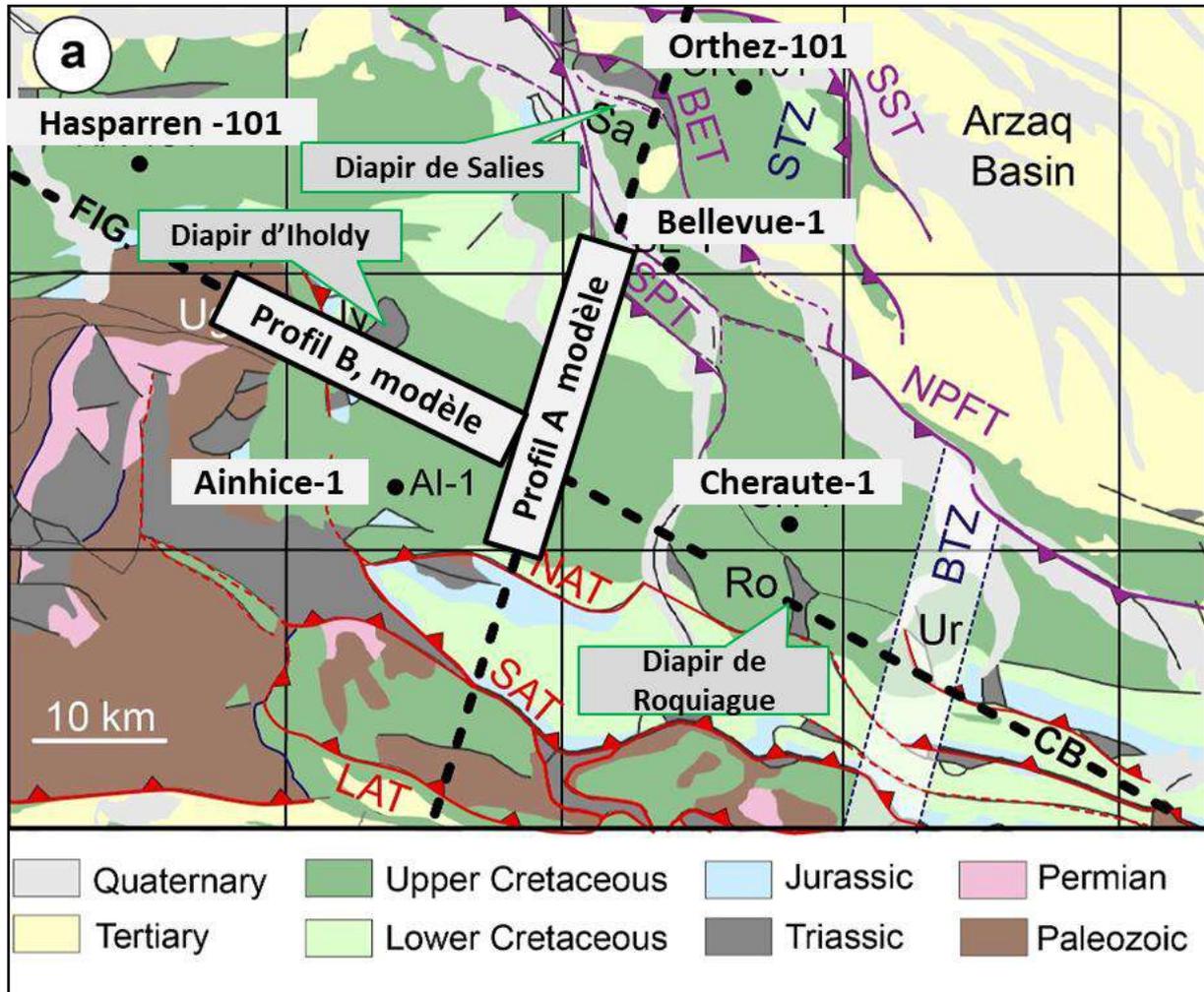


Schéma d'un système propice à la génération d' H_2 et son accumulation en contexte de piedmont. L'eau météorique s'infiltrant se réchauffe via les fractures au cœur de l'orogène. Les boucles de convections hydrothermales vont être générées à l'approche des roches mantelliques et du flux de chaleur en base de croûte, avec une remontée vers la surface, des eaux hydrothermales ainsi créées, et surtout de l'hydrogène par d'autres systèmes de failles. L'apport en eau, en continu, est nécessaire à la réaction, en continu, de serpentinisation. D'après Moeck et al., 2014, modifié par N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.

Essayons maintenant d'identifier un tel système dans la région du Bassin de Mauléon à partir de la carte géologique ci-dessous.



Carte géologique et structurale du bassin de Mauléon avec les divers chevauchements à vergence nord (en violet) et à vergence sud (en rouge). Localisation des anciens forages (AI-1 Ainhice-1, OR-102 Orthez-102, BE-1 Bellevue-1, HA-101 Hasparren-101, CH-1 Cheraute-1) et les deux profils qui ont servi à la modélisation géophysique (cf. chapitre précédent page 46). D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution in a Hyperextended Rift Suture: Implication for Natural Hydrogen Exploration (Mauléon Basin, Pyrenees)*. *Tectonics*, 2024, 43 (8),

Si on examine le cadre structural actuel du bassin de Mauléon, on constate qu'il est rempli majoritairement par de flysch du Crétacé sup. traversé par d'anciens diapirs de sel, très déformés, (ex. « diapir » d'Iholdy et de Salies). Le bassin de Mauléon est séparé du bassin d'Arzac (bassin prolifique en huile et gaz naturel) par la ride de Grand Rieu, non affleurante, mais bien visible en sismique et confirmée par forages. Dans la partie sud-est du bassin de Mauléon existe une zone de transfert (BTZ = Zone de transfert de Barlanès), orientée N-20° et qui représente la bordure SE du bassin. Plus vers le SE, on passe dans un autre domaine des chaînons béarnais.

Le bassin de Mauléon est limité vers le nord par plusieurs chevauchements associés, orientés N 120°, tous à vergence nord (violet sur la carte) à savoir du nord au sud :

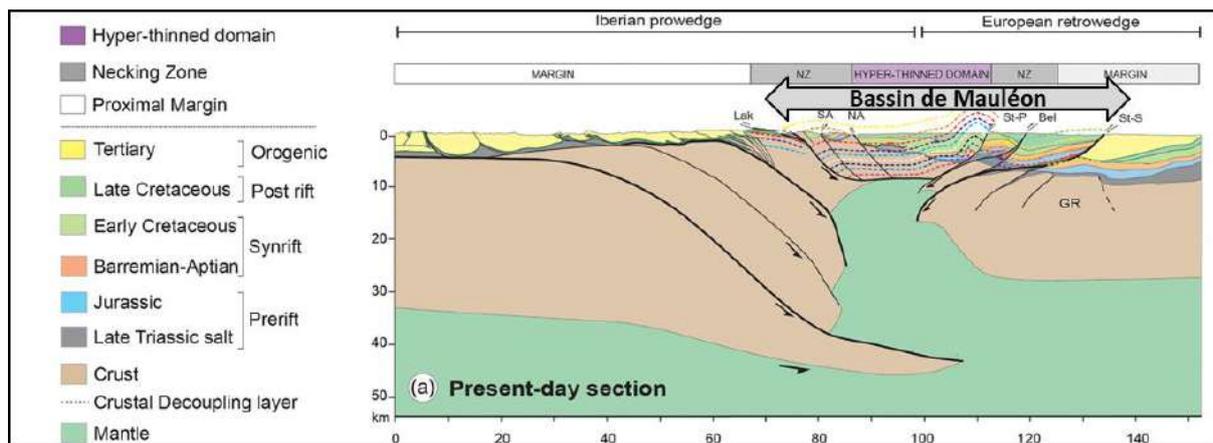
- le Chevauchement de Sainte Suzanne (STZ = Saint Suzanne Thrust)
- le Front de Chevauchement Nord Pyrénéen (NPFT sur la carte = **N**orth **P**yrenean **F**ront **T**hrust en anglais ou FCNP = Front de Chevauchement Nord Pyrénéen en béarnais et français), c'est le chevauchement majeur de toute la Zone Nord Pyrénéenne, qu'il limite vers le nord, et s'étend sur plusieurs centaines de km avec plusieurs chevauchements associés, tous à vergence nord (en violet sur la carte) à savoir du nord au Sud :
 - o le Chevauchement de Bellevue (BET = Bellevue Thrust)
 - o le Chevauchement de Saint Palais (SPT = Saint Palais Thrust)

Pour la bordure sud du bassin de Mauléon, plusieurs fronts de chevauchements, orientés aussi N-120°, tous à vergence sud (en rouge sur la carte), sont cartographiés, à savoir sud au nord:

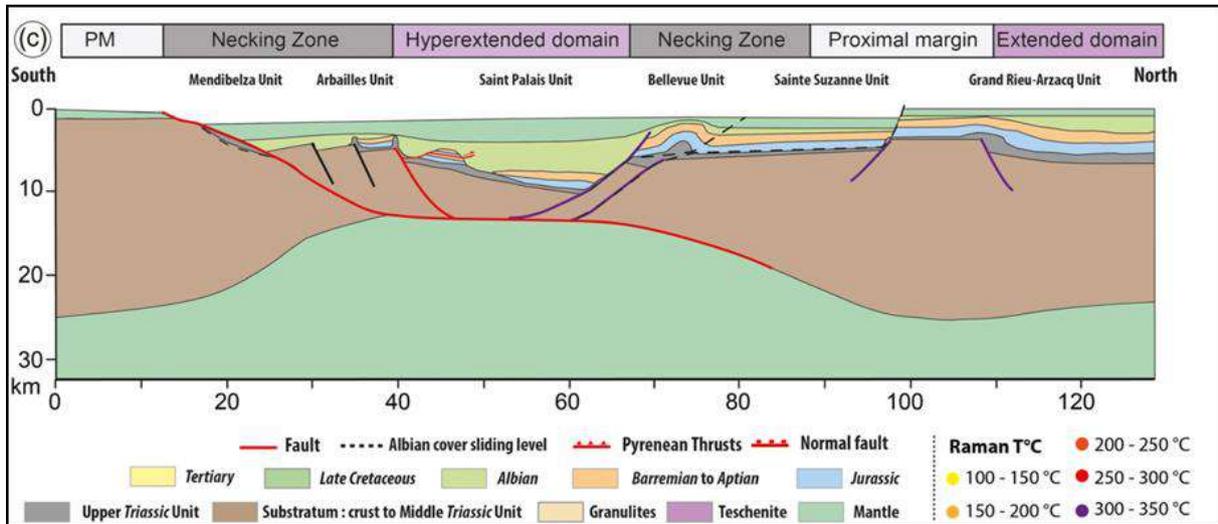
- le chevauchement de Lakhoura (LAT = Lakhoura Thrust). C'est le chevauchement principal de cette bordure sud et qu'on peut suivre sur des dizaines de km. Pour certains géologues, mais à tort, ce chevauchement est assimilé à la Faille Nord Pyrénéenne qui existe bien plus à l'est dans les Pyrénées, mais qui n'existe plus dans ce secteur (mais c'est un autre sujet ...).
- le chevauchement des Arbailles Sud (SAT = South Arbailles Thrust)
- le chevauchement des Arbailles Nord (NAT = North Arbailles Thrust)

Pourquoi autant insister sur ces chevauchements ? C'est qu'ils vont jouer un rôle prépondérant pour l'infiltration des eaux météoriques nécessaires la serpentinisation des lherzolites, mais aussi pour la migration de l'hydrogène vers la surface, en espérant qu'il soit piégé quelque part, avant d'arriver en surface.

Ce schéma structural actuel résulte de la compression pyrénéenne. Si on se replace au moment du rift albien, on a alors un schéma complètement différent, typique d'un rift en hyper-extension et avec exhumation partielle et locale du manteau supérieur. Les failles inverses de chevauchement étaient initialement les failles normales bordières du rift, qui ont été reprises en failles inverses, créant ainsi une image dite en "pop-up" (en français, structure en éventail ou structure en fleur).

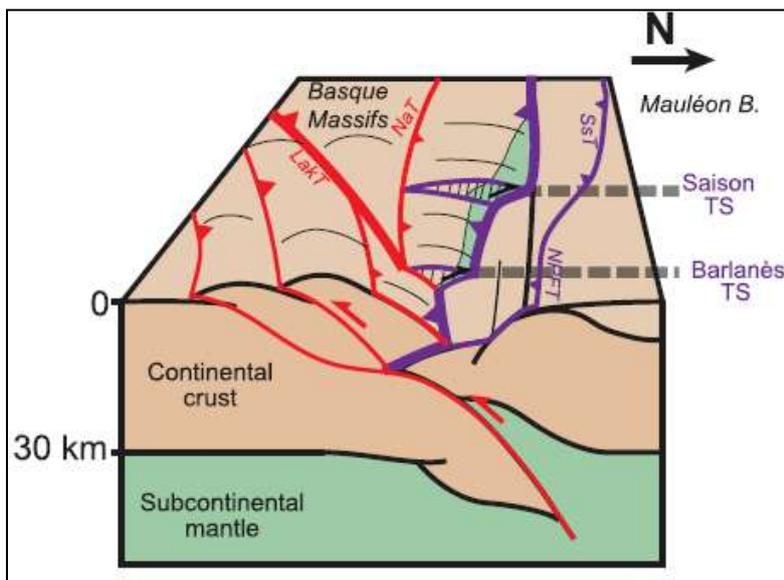


Coupe NS montrant l'état actuel du bassin de Mauléon. Le schéma structural actuel montre une part d'héritage venant de la période de rifting. Légende des abréviations: Lak= Lakhoura thrust; SA = South-Arbailles thrust; NA = North-Arbailles thrust; St-P= Saint-Palais thrust; Bel= Bellevue thrust; St-S= Sainte-Suzanne thrust. D'après N. Saspiturry et al. 2020



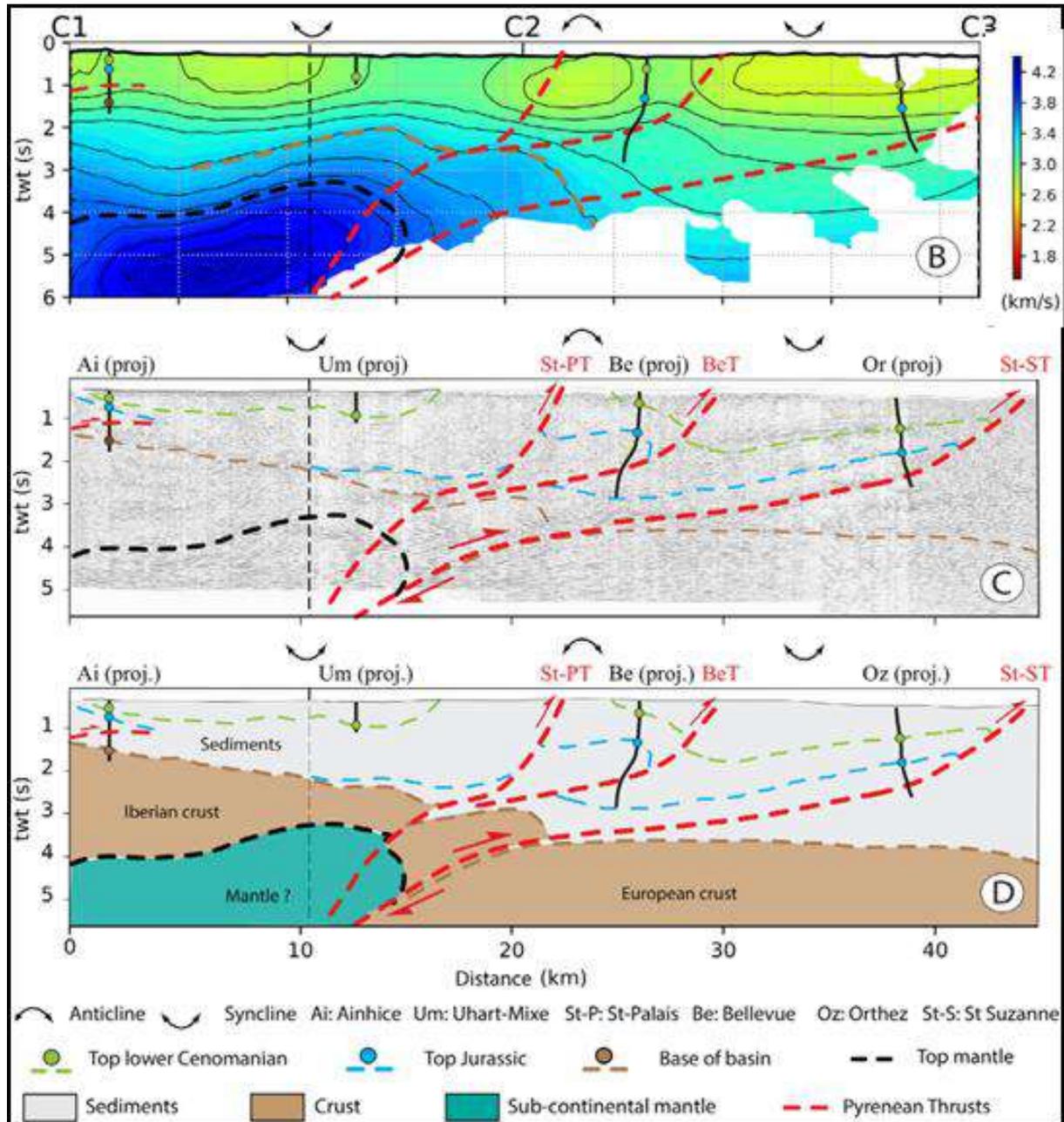
Coupe crustale équilibrée / « balancée » et restaurée au Santonien, époque du rift avec exhumation locale du manteau. D'après Saspiturry et al. 2020.

Le schéma structural actuel correspond à une géométrie en « pop-up » ou en éventail, avec les chevauchements au nord du bassin, avec une vergence nord et les chevauchements au sud avec une vergence sud ; tous s'enracinant en profondeur dans une même zone, sous le bassin sédimentaire de Mauléon. Le tout affecté de zones transformantes transverses à N°20 (Zones transformantes du Saison et de Barlanès). Le schéma en bloc diagramme suivant illustre bien ce contexte structural actuel.

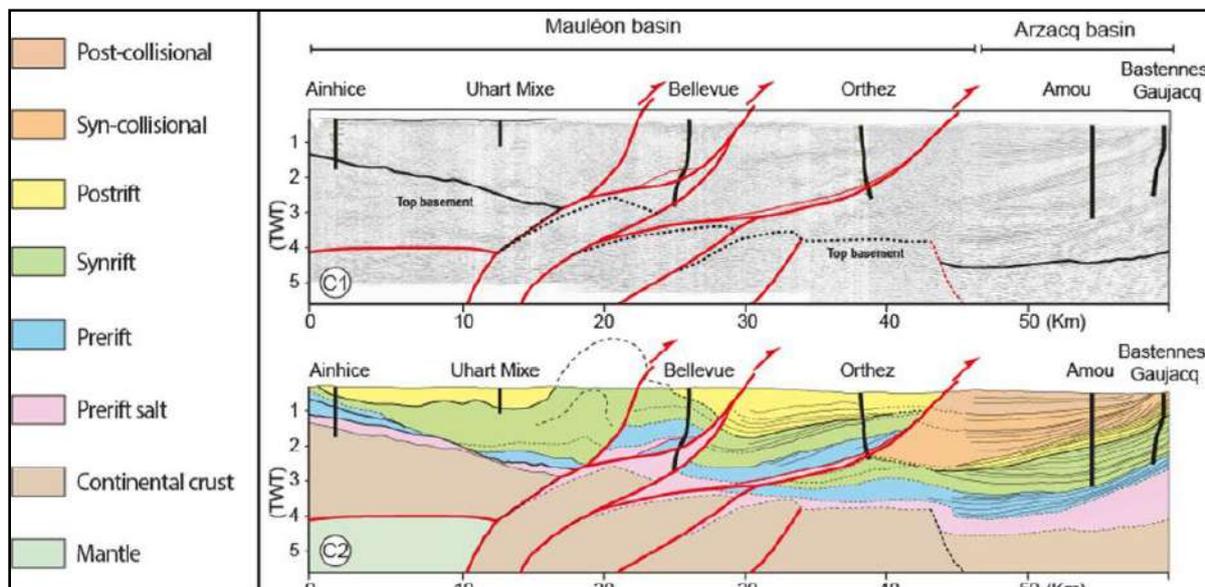


Bloc diagramme schématique en 3D, montrant l'architecture structurale en « pop-up » du bassin de Mauléon. La nomenclature des chevauchements et le code couleur sont les mêmes que sur la carte précédente. A noter que le remplissage sédimentaire n'est pas figuré afin de se focaliser sur le schéma structural. D'après N Lefevre, thèse Grenoble, 2022, modifié d'après Lescoutre et Manatschal, 2020.

L'interprétation sismique de profils anciens, confirmerait que les chevauchements à vergence nord annexes au FCNP, c'est à dire les chevauchements de St Palais, Bellevue et de Sainte Suzanne, s'enracineraient tous en profondeur au niveau du manteau.



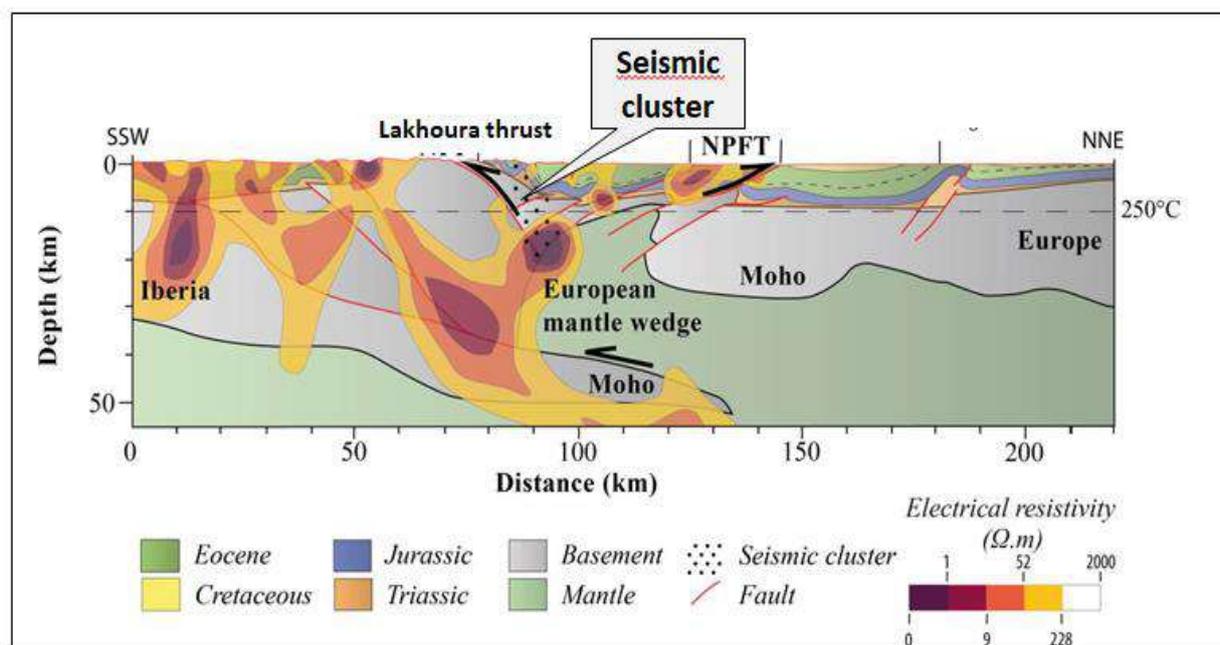
Profil sismique ancien (des années 70 ou 80?) de direction SW-NE dans la partie ouest du bassin de Mauléon (localisation sur la carte). Coupe supérieure exprimée en vitesse sismique, avec une anomalie de vitesse significative (en bleu foncé) qui correspondrait au manteau. Coupe intermédiaire: sismique classique avec positionnement des puits d'exploration pétrolière. Coupe inférieure: interprétation géologique correspondante, montrant l'enracinement en profondeur des divers chevauchements à vergence nord, dans l'anomalie de vitesse interprétée comme étant constituée de périodites du manteau. Page BSGF - Earth Sciences Bulletin 2021, 192, 47, M. Lehujeur et al. Published by EDP Sciences 2021



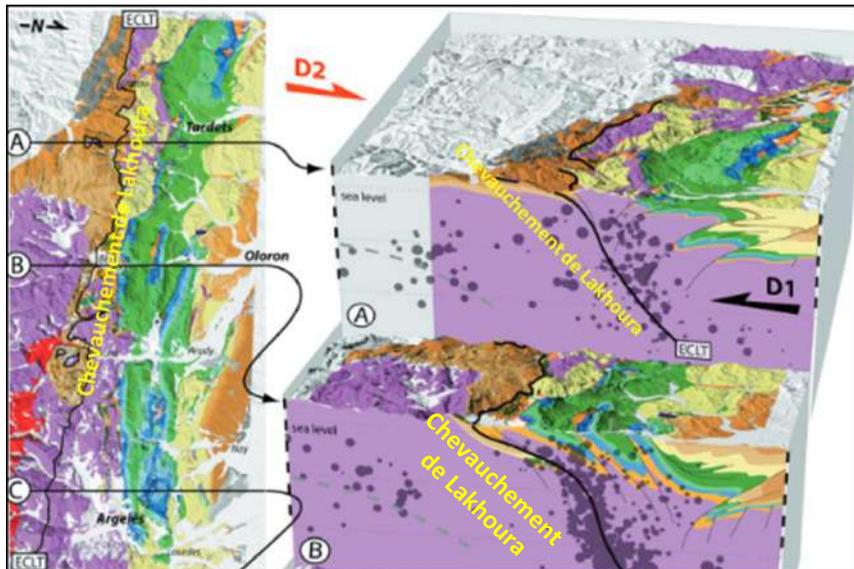
Coupe géologique basée sur un profil sismique, montrant que les chevauchements majeurs s'enracineraient en profondeur. Modifié d'après Saspiturry et al., 2019.

Relations micro-sismicité et serpentinisation des périddotites du manteaux

Si vous résidez dans le Pyrénées ou à proximité, vous n'êtes pas sans savoir que les Pyrénées sont sujettes en permanence à des tremblements de terre. La Zone Nord Pyrénéenne est la zone la plus orogénique de la chaîne, soulignée par des tremblements de terre nombreux, mais en général de faible intensité. A noter, que les mécanismes au foyer de ces séismes, fonctionnent en extension actuellement (mais ceci est un autre sujet). La partie profonde de la faille de Lakhoura se superpose avec les essaims de sismicité, prouvant que cette faille (entre autres) est toujours active.



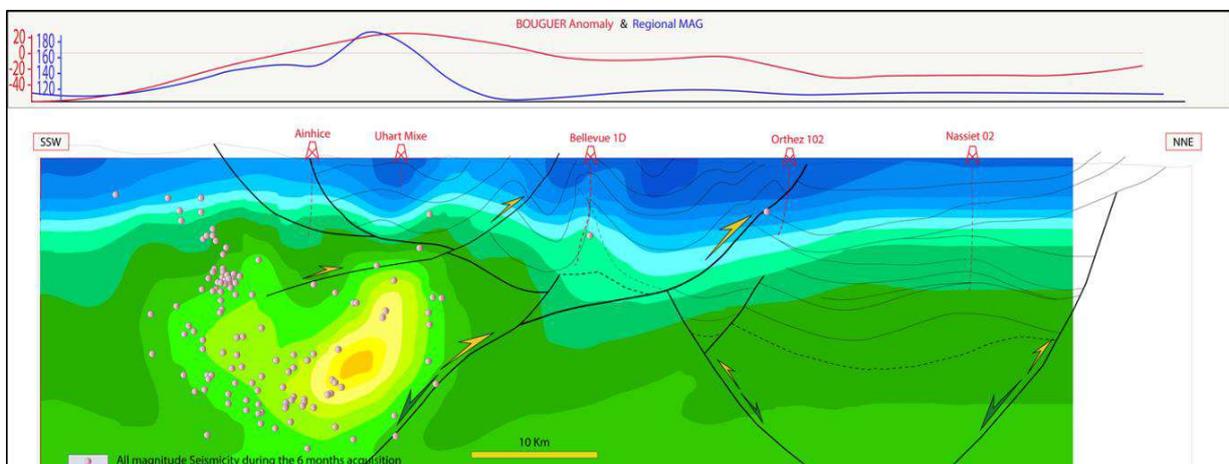
Interprétation géologique d'un modèle tomographique, surimposé à un modèle 2D de résistivité électrique avec la projection de l'essaim de sismicité ("seismic cluster")
D'après Wang et al, 2016 et Campanya et al, 2012 et Souriau et al, 2014



Blocs diagrammes montrant la localisation de l'origine des séismes (points violets sur les coupes). La section centrale passant par Oloron, montre que la majorité de l'activité sismique est concentrée dans une zone étroite et avec un fort pendage vers le nord, ce qui correspond au chevauchement de Lakhoura, basé sur les données géologiques de surface. La section passant par Tardets montre une activité sismique plus diffuse. D'après Dumont et al, 2025.

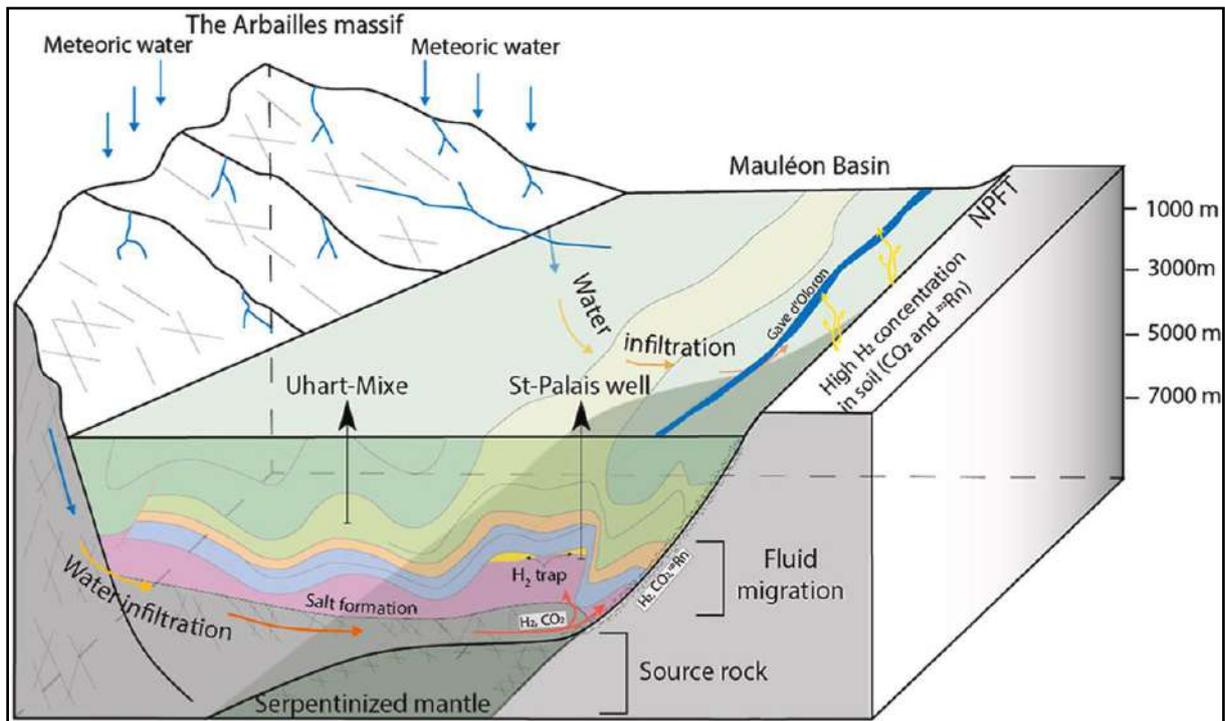
Une partie de cette sismicité ne serait pas due à des mouvements tectoniques mais pourrait être expliquée, soit par des surpressions associées aux circulations fluides, soit par une augmentation du volume des lherzolites, associée à sa serpentinisation. Cette augmentation de volume aura pour effet de modifier le champ de contraintes et de provoquer des micro-fractures et d'induire de la micro sismicité.

La campagne de sismique passive réalisée il y a quelques années dans le bassin de Mauléon, permet de mieux appréhender cette micro sismicité ; il s'avère que cette micro sismicité est directement associée à l'enveloppe du corps mantellique de péridotites. Ces microséismes pourraient donc être associés à la fracturation des péridotites, à cause de l'augmentation de volume des péridotites en cours de serpentinisation. On tiendrait alors un outil de prospection original pour l'hydrogène ? C'est-à-dire se focaliser sur les corps mantelliques sujets à de la micro sismicité localisée dans les corps de péridotites, en relation avec une génération d'hydrogène ? Il faut noter que l'opérateur du PER de Mantle8, dans le bassin du Comminges/Baronnies, a mis en oeuvre cette approche, en cherchant à corréler micro sismicité et anomalie gravimétrique correspondant à un corps mantellique.



Profil en vitesse sismique (couleur jaune les plus rapides, bleu les plus lentes) à travers le bassin de Mauléon, issue de l'acquisition de sismique passive. En haut, reports des profils, gravimétrie et de magnétisme. Les micro séismes (petits cercles blancs) projetés sur ce profil sont majoritairement localisés à l'intérieur mais surtout sur l'enveloppe de ce corps présentant des vitesses sismiques élevées, une densité élevée et une anomalie magnétique, qui correspondrait a priori à un corps de roches du manteau. D'après S. Calassou et al, Native H₂ seeps in the NW Pyrénées. An active mantle reactor factory ? Présentation RST, Lille, 2018.

Le rôle des chevauchements qui bordent au nord et au sud le bassin de Mauléon, jouent donc un rôle essentiel pour l'infiltration des eaux météoriques en profondeur pour faire fonctionner la serpentinisation, mais aussi pour la migration de l'hydrogène à partir de la roche-source vers la surface. De plus la micro sismicité associée à un corps mantellique apporte un nouveau critère original pour délimiter un corps mantellique en voie de serpentinisation. Ainsi le schéma du système hydrogène du bassin de Mauléon commence à prendre forme et peut se résumer par le bloc diagramme suivant. L'aspect réservoir, couverture et pièges au sein du bassin sera abordé dans les paragraphes suivants.

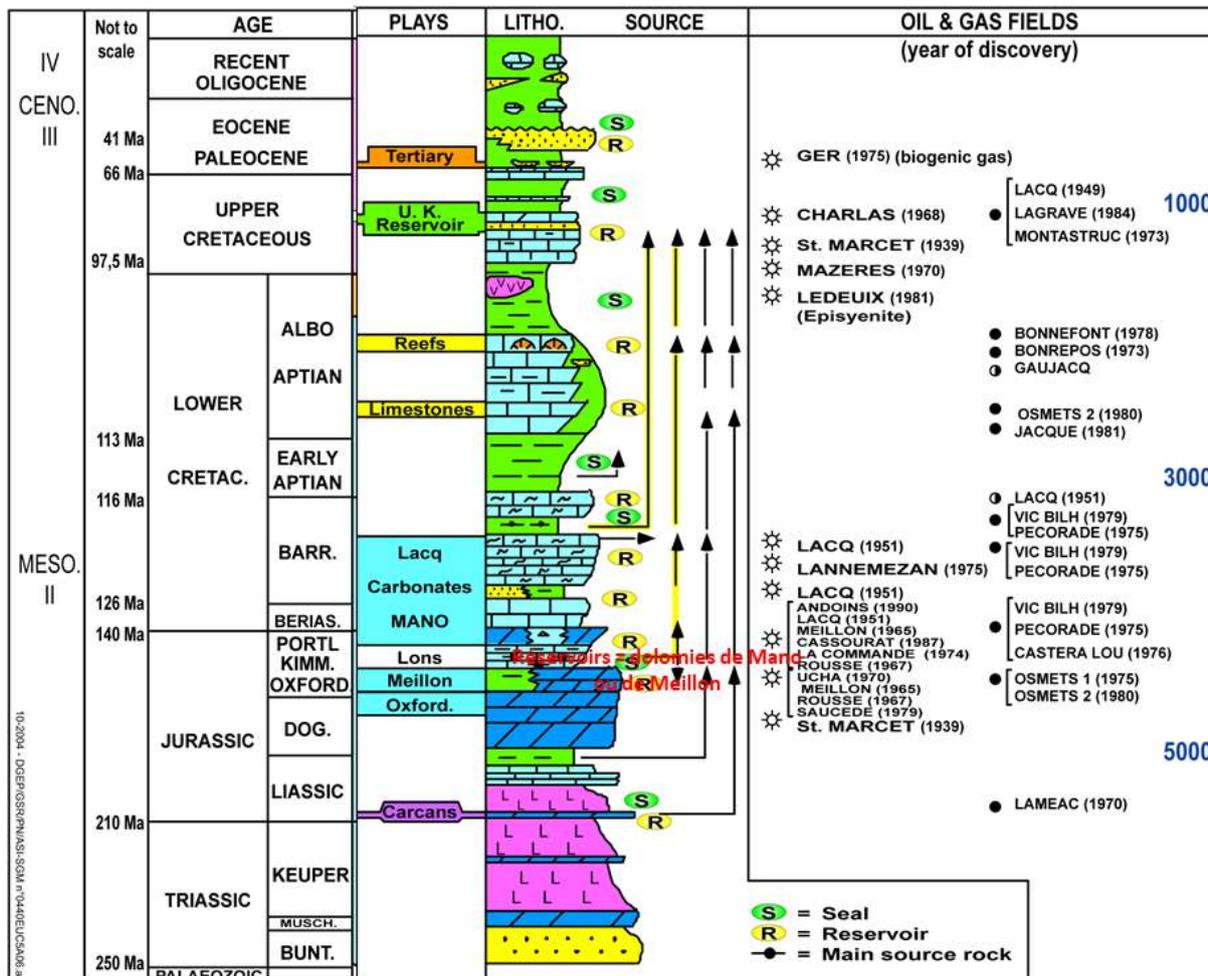


Bloc diagramme schématique, illustrant le système hydrogène du bassin de Mauléon. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2021.

6-3-5 Les couples réservoirs /couvertures potentiels

Dans le système pétrolier, il est difficile de d'évaluer séparément roches-réservoirs et roches - couvertures, il en est de même pour le système hydrogène, car il faut une couverture efficace impérativement au dessus du réservoir pour que cette roche réservoir puisse jouer pleinement son rôle de réservoir et d'accumulation d'un volume commercial d'H₂ et non pas une roche par laquelle transitent les fluides (gaz, huile, H₂) lors de sa migration per ascensum.

Mises à part de potentielles roches réservoirs anté-salifères (par exemple grès du Trias inf/ moyen ou du Permien), on va se retrouver avec la même problématique que la recherche des réservoirs du système pétrolier voisin du bassin d'Arzacq.



Chartre stratigraphique et systèmes pétroliers du bassin d'Aquitaine sud. Si on se réfère à cette chartre, les principaux réservoirs qui concerneraient le bassin de Mauléon voisin, seraient les formations indiquées en bleu clair : Carbonates de Mano /Meillon et calcaires barrémiens, rencontrés dans les gisements de méthane de Lacq profond et Meillon/St Faust. Les autres réservoirs supérieurs comme les carbonates du Crétacé sup (gisement de Lacq sup ou de Lagrave) sont absents dans le bassin de Mauléon. Reste le potentiel des réservoirs anté-salifères des grès du Trias inférieur à explorer Mais seulement pour l'H₂? Document elf, d'après JJ Biteau, 2010

Remarques : Le système pétrolier avec comme réservoirs les grès du Trias inférieur est inopérant, car les roches mères classiques du Jurassique (formation dite de Lons) se trouvent bien au dessus de la barrière des évaporites triasiques. Et il n'est guère possible qu'elles alimentent « per-descensum » ces grès du Trias. Par contre, pour le système hydrogène, le concept est tout à fait jouable : l'hydrogène provenant de la profondeur, piégé (à condition qu'il y ait un piège !) dans un réservoir gréseux ou dolomitique du Trias moyen ou inférieur, recouvert par une couverture d'anhydrites du Trias sup. a priori très efficace.

Le système pétrolier basé sur la dolomie dite de Carcans (Trias sup/Lias basal) qui joue à la fois le rôle de roche mère et de réservoir, n'a été démontré que dans le petit gisement de Laméac, gisement marginal ne produisant plus.

Pour les réservoirs « classiques » démontrés dans le bassin d'Arzacq voisin par les gisements de méthane de Lacq et Meillon Saint Faust, il s'agit de réservoirs, quasiment tous de type carbonates: par exemple dolomies de Meillon et de Mano : réservoir carbonatés avec une faible double porosité (matrice + fractures, 1 à 10 % de porosité), mais suffisante pour des réservoirs de méthane avec de fortes pression (650 bars à Lacq profond) et donc à priori favorable pour d'hydrogène.

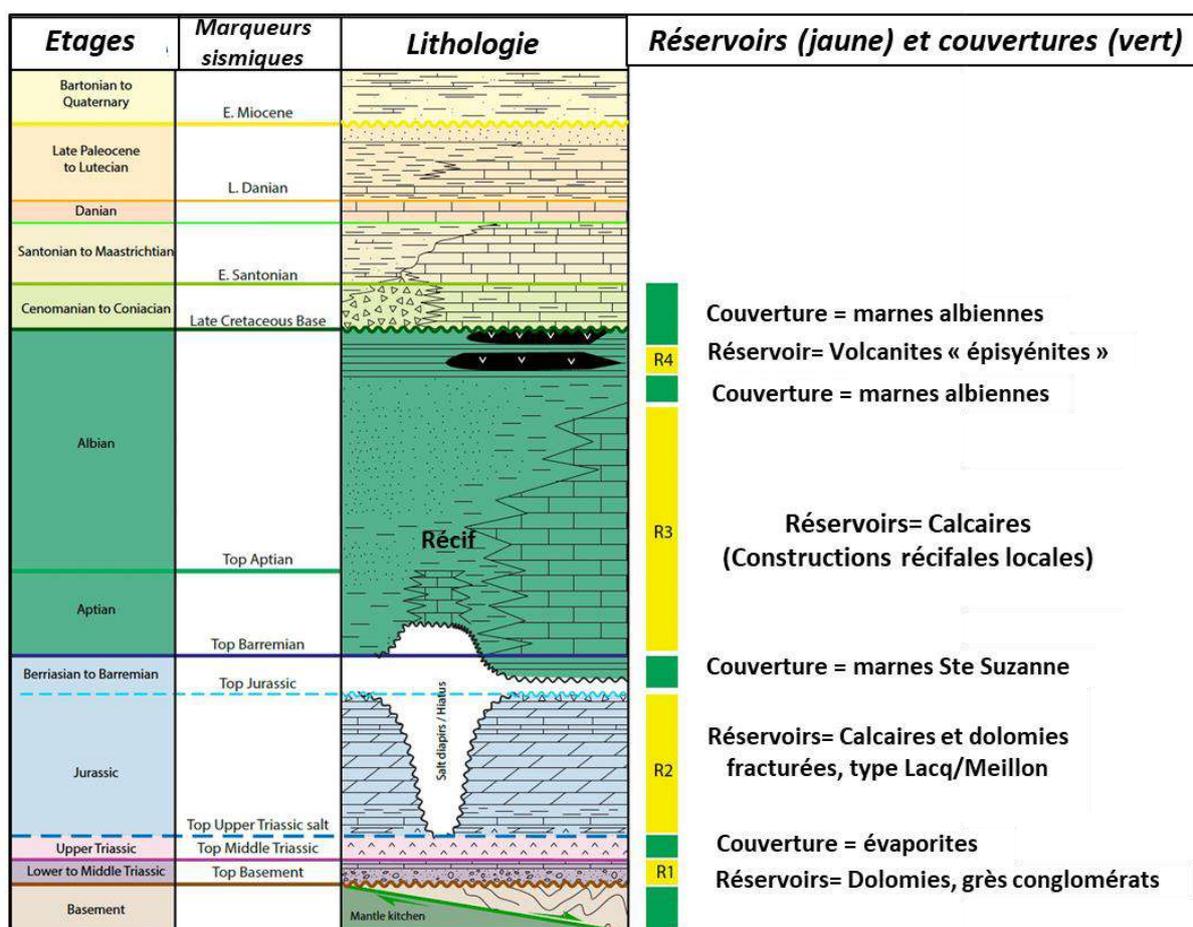
Accessoirement, il faut mentionner comme réservoirs les constructions récifales albiennes qui ont « poussé » à partir de la plate-forme carbonatée aptienne, les marnes albiennes assurant alors la couverture. A l'affleurement, il existe plusieurs constructions récifales de type « mund mound » (= tas de boues calcaires) autour d'Arudy et plusieurs constructions récifales ont été identifiés en

sismique dans le bassin d'Arzacq (ex : Morlaas, Gaujacq) qui ont toutes été forées mais sans succès, malgré des indices d'huile intéressantes dans le récif de Gaujacq. Nous ne savons pas si ce type de structure existe dans le bassin de Mauléon.

Et pour l'anecdote, il faut aussi mentionner des réservoirs très particuliers dans des roches volcaniques albiennes. Il s'agit de dykes et sills intrusifs de gabbros appelés localement des « teschérites » (vous pouvez oublier ce nom !). En cas de fracturation et/ou d'altération de ces gabbros, une porosité secondaire (environ 10 %) peut ainsi se créer ; un petit gisement de méthane (réserves 0.115 millions de m³) a été découvert en 1961 par hasard près de Ledeux et a fait l'objet d'une petite production par deux puits. Pas d'H₂S, ni de CO₂.

Le système pétrolier prouvé à Lagrave ou Lacq supérieur, faisant intervenir les carbonates du Crétacé sup. ne peut pas être invoqué pour l'hydrogène, car ces formations n'existent pas dans le bassin de Mauléon (Crétacé sup sous faciès flysch et non de plate-forme carbonatée).

Le schéma ci-dessous résume où pourraient se trouver les réservoirs potentiels pour une accumulation d'hydrogène dans le bassin de Mauléon.



Charte litho stratigraphique avec marqueurs sismiques classiques et réservoirs potentiels pour l'hydrogène dans le bassin de Mauléon

R1- Dolomies et grès du Trias moyen et inférieur, surmontés par une couverture efficace constituée d'évaporites épaisses du Trias sup, à condition qu'un piège soit présent, est l'objectif certainement le plus prometteur pour accumuler de l'hydrogène natif en provenance du manteau.

R2- Réservoirs classiques des gisements du bassin d'Arzacq : exemple dolomies de Mano et Meillon et calcaires barrémiens, surmontées d'une couverture démontrée dans le bassin d'Arzacq, constituée par quelques centaines de mètres de marnes de Sainte Suzanne d'âge Aptien, qui « tiennent » des pressions de 600 bars pour le méthane à Lacq.

R3 – Objectifs considérés comme secondaires et qui restent à démontrer dans le bassin de Mauléon. Constructions récifales de type « mud mounds » représentés à l'affleurement à Arudy (= les fameux marbres d'Arudy !). Ces constructions récifales « montent » plus ou moins haut dans l'Albien. A Lacq sup. le récif de Lacq a été « scalpé » par le discordance à la base du Crétacé sup, ce qui a ouvert un passage à la migration des

huiles qui se sont accumulées dans le gisement de Lacq sup. Par ailleurs, les marnes albiennes ne sont pas forcément très efficaces en tant que couvertures.

R4 - Gabbros en sills et dykes injectés dans les marnes albiennes. Pour que ces roches volcaniques prennent des propriétés réservoirs il faut qu'elles soient fracturées et/ou altérées. Le petit gisement de méthane de Ledoux démontre que c'est possible. Les marnes albiennes enveloppant ces roches volcaniques joueraient à la fois le rôle de roche-mère et le rôle de couverture étanche ? Mais une autre interprétation basée sur des analyses isotopiques, indiquerait une origine abiotique pour ce gaz. Se rappeler que dans le gisement d'hydrogène du Mali, ce sont des niveaux de roches volcaniques du Trias, des dolérites, qui jouent le rôle de couverture efficace. D'après Martin Neumaier, ArianeLogix, poster EAGE, GET2023

Les couvertures

Nous venons de voir précédemment que deux types de couvertures potentielles sont présentes dans le bassin de Mauléon, les évaporites du Trias sup et les marnes de Sainte Suzanne, d'âge aptien.

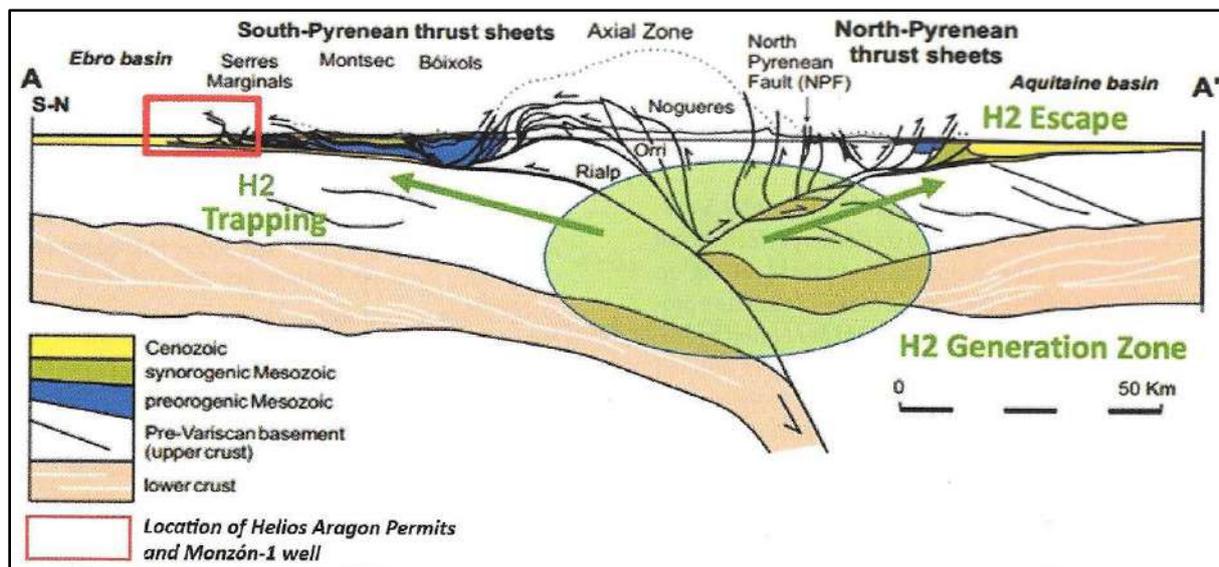
Les évaporites (halite, anhydrite, gypse)

Les structures géologiques constituées de roches évaporitiques sont utilisées depuis longtemps comme des réservoirs stratégiques pour les hydrocarbures, mais également pour stocker des déchets radioactifs. En effet les roches évaporitiques sont connues pour leur très faible perméabilité. Cette caractéristique n'est pas impactée de façon significative par les variations de composition des roches ou en présence de déformations tectoniques. Comparé à d'autres roches, telles que les granites, les dolomies ou les argiles, le sel est une des roches dont la perméabilité est la plus faible.

Les évaporites ont également de très bonnes propriétés mécaniques et géochimiques leur permettant de résister aux contraintes induites par la pression de gaz et sont inertes vis-à-vis de l'H₂ facilitant une bonne tenue du réservoir sur le long terme. Plusieurs sites pilotes du stockage d'H₂ en cavité saline sont d'ores et déjà en fonctionnement comme en Angleterre ainsi qu'au Texas.

Dans le bassin de Mauléon, les évaporites du Trias sup se trouveraient entre 2800 et 5000⁺⁺ m de profondeur. Il serait intéressant d'avoir des données concernant l'épaisseur de ces évaporites (interprétation sismique, forages qui auraient éventuellement pénétrés ces formations).

L'efficacité du sel triasique pyrénéen est démontrée indirectement par le forage de Monzon-1. Ce forage datant de 1963, au sud-est de Huesca en Espagne, au niveau du Front de Chevauchement Sud Pyrénéen, a découvert des indices d'H₂ significatifs, dans les formations gréseuses du Trias inférieur entre 1368 et 3714 m de profondeur, juste avant d'atteindre sa profondeur finale de 3715 m. On peut supposer que cet H₂ a été généré à partir d'une source profonde constitué de manteau sous la zone axiale/Haute Chaîne Primaire des Pyrénées, serpentinisé à l'instar de ce que nous connaissons sur le versant nord des Pyrénées. L'H₂ aurait migré latéralement vers le sud sur une distance horizontale d'environ 80 km, le long du plan du Front de Chevauchement Sud Pyrénéen et sous la semelle de sel triasique qui par ailleurs a favorisé le glissement le long de ce chevauchement, pour venir finalement se piéger dans l'anticlinal de Barbastro qui comporte plus de 1000 m de sel dans son coeur de « zone triangulaire » (sel triasique, mais aussi cénozoïque). Cf. module n°9 de Géol Pyr.



Coupe géologique à travers les Pyrénées, montrant la migration sur 80 km en horizontal jusqu'au puits de Monzón-1. L'H₂ est généré à partir du manteau serpentinisé à grande profondeur sous la zone axiale, et migre le long du Chevauchement Sud Pyrénéen, sous la semelle de sel triasique associée à ce décollement tectonique, qui joue le rôle de couverture étanche à l'hydrogène. D'après Ch. Atkinson et al, revue *Géologues*, n° 213, Juin 2022, dossier : Hydrogène et gaz rares.

Les trous dans le tapis de sel : un défaut dans la couverture et donc un autre chemin de migration potentiel pour l'hydrogène

Dès le Crétacé, certains vrais diapirs à l'époque ont été actifs et ont mobilisé dans leur ascension des quantités de sel importantes. Toutes les coupes géologiques au stade actuel, post-phase de compression pyrénéenne, montrent que le sel est impliqué, voire injecté dans les chevauchements en servant d'ailleurs de « lubrifiant » pour les mouvements tectoniques. Ce sel va donc manquer ailleurs dans son emplacement initial créant ainsi des vides dans les couches d'évaporites initialement continues au moment de leur dépôt. Ce phénomène des « trous dans le tapis de sel », est bien connu des explorateurs pétroliers ; par exemple les systèmes pétroliers du Gabon, Congo et Angola avec des roches-mères anté-salifères (sel aptien) alimentant des pièges pos-salifères, ne peuvent fonctionner que grâce à ces trous dans le tapis de sel.

Ces trous dans le tapis sont un voie de passage à travers les couches du Trias sup, pour l'hydrogène dans sa migration vers la surface, reste à les identifier et les localiser, ce qui n'est pas un défi majeur compte tenu de la qualité de la sismique; évidemment en plus des chevauchements chemin de migration potentiel de l'hydrogène.

Les argiles

Les marnes de Sainte Suzanne (argiles calcaires), d'âge Bédoulien selon la nomenclature ancienne (= Aptien inférieur) constituent la couverture ultime des réservoirs à gaz de Lacq profond. Cette formation de seulement quelques centaines de mètres d'épaisseur est facilement reconnaissable dans les paysages du Piémont pyrénéen car elle constitue une bande de terrains avec une végétation surtout herbeuse qui contraste avec la végétation, avec des arbres, qui poussent sur les formations environnantes.

Il faut remarquer qu'en tant que couverture, quelques centaines de mètres de marnes sont capables de « retenir » des accumulations de gaz naturel avec des pressions de de 650 bars dans le gisement de Lacq.

Donc, cela reste à prouver, mais les marnes de St Suzanne sont une roche couverture potentielle dans le système hydrogène du bassin de Mauléon.

6- 3-6 Les pièges

Compte tenu ce que nous savons désormais sur les réservoirs et la couverture il va falloir s'intéresser au dernier élément du système hydrogène, à savoir les pièges, où pourrait se trouver des accumulations commerciales d'hydrogène. En résumé, il va falloir trouver des pièges qui incorporent :

- 1- grès ou dolomies du Trias inférieur /moyen surmontés des évaporites du Trias supérieur. A savoir que les grès du Trias inf. peuvent être cimentés et donc présenter de mauvaises caractéristiques réservoirs. Il faudrait alors envisager d'autres réservoirs potentiels plus anciens (s'ils sont présents !) comme le Permien ? voire le Dévonien ?
Les cartes anciennes d'elf (cartes isochrones, isobathes et isopaches au toit et à la base du sel) élaborées à partir de la sismique 2D (années 60 à 90) sont indispensables pour éventuellement définir des pièges sous le sel. A savoir que les niveaux d'évaporites peuvent constituer une sorte d'écran à la pénétration des ondes sismiques, ce qui rend la base du sel difficile à restituer correctement en sismique. De nouvelles acquisitions sismiques (ex. longs offsets) et traitement sismique approprié (ex. migration profondeur avant « stack ») devrait permettre de mieux imager la base du sel.
Des cibles de ce type ont déjà été identifiées dans le cadre des travaux de N. Lefevre : anticlinal sous le Trias sup à 3000 m de profondeur ? Cible à 4000 m de profondeur entre Sauveterre de Béarn et Saint Palais ? Anticlinal au niveau du Trias à 3000 m de profondeur entre Salies de Béarn et Bérenx ?
N'ayant pas accès aux anciennes données d'elf, en particulier sismiques, il est impossible de se faire sa propre idée sur ces cibles mentionnées ci-dessus, sauf en consultant les anciens géologues qui ont travaillé sur ce secteur !
- 2- une combinaison similaire à celle du gisement de gaz à Lacq, dolomies de Mano /calcaires barrémiens surmontés par les Marnes de St Suzanne. A nouveau, les cartes d'elf issues de l'ancienne sismique 2D, telles qu'au top Aptien ou top Barrémien (marqueurs sismiques classiques), combinées aux failles des chevauchements sont indispensables pour définir les pièges. Dans ce secteur du bassin de Mauléon, on ne part pas de zéro, puisque plusieurs structures ont déjà été forées mais sans succès pour les hydrocarbures, donc a priori sans succès pour l'H₂. Un inventaire et un diagnostic des échecs pétroliers sont aussi indispensables. Les structures déjà répertoriées, mais non forées, seront à ré-étudier avec un objectif hydrogène.
- 3- des pièges associant réservoirs traditionnels post-salifères, mais créés par des soi-disant diapirs de sel, même très déformés par la tectonique, assurant latéralement la couverture étanche, ce qui représente une autre configuration de pièges prometteurs. Les flancs d'un dôme de sel sont toujours difficiles à imager en sismique surtout en 2D. Une campagne sismique 3D adaptée à ce genre d'objectifs serait à envisager.

L'idéal serait de pouvoir combiner sur une même verticale :

- un objectif « classique » par exemple une structure antiforme formée d'un empilement d'écaillés (« antiform stack ») de réservoirs jurassiques (analogues au gisement de Lacq) associées en profondeur, à un chevauchement majeur comme le Front de Chevauchement Nord Pyrénéen,
- et un objectif anté-salifère à une profondeur inférieure à 5000 m, par exemple juste au sud de ride de Grand Rieu.
On peut alors faire coup double, en réduisant les risques, avec un seul forage à un coût raisonnable.

Le schéma ci-dessous illustre quelques types 2 et 3 de pièges déjà identifiés dans le secteur de Sauveterre de Béarn dans le cadre de la thèse de N. Lefeuvre (2022).

- l'anticlinal de Sauveterre de Béarn: anticlinal classique, avec réservoirs carbonates et couverture des marnes de Sainte Suzanne, de type Lacq, situé à 3 000 m de profondeur
- l'anticlinal de Bérenx avec réservoirs calcaires et niveau d'évaporites interstratifiés du Barrémien? Couverture argileuse (marnes de Sainte Suzanne), située également vers 3 000 m de profondeur
- piège contre les flancs du diapir de Salies, réservoirs type Lacq. Couverture = sel du flanc du diapir vers 4 000 m de profondeur. Reste à localiser avec précision les flancs du diapir, s'il existe....

Il faut remarquer que toutes ces cibles sont dans la fenêtre adéquate pour les températures, c'est à dire entre 100 et 200 °C, gammes de températures où l'hydrogène est peu réactif, activité microbienne faible ou nulle, peu de minéraux oxydés répertoriés pouvant entrer en réaction avec l'H₂ (ex Pyrite).

A noter également que d'après ce schéma, les pièges type « horst » anté-salifères se situeraient à plus de 7 000 m de profondeur ! Sauf vouloir battre le record de profondeur du forage de Bellevue datant de plus de quarante ans (TD 6 909 m), il vaut mieux rechercher un site où la cible sous le sel est moins profonde !

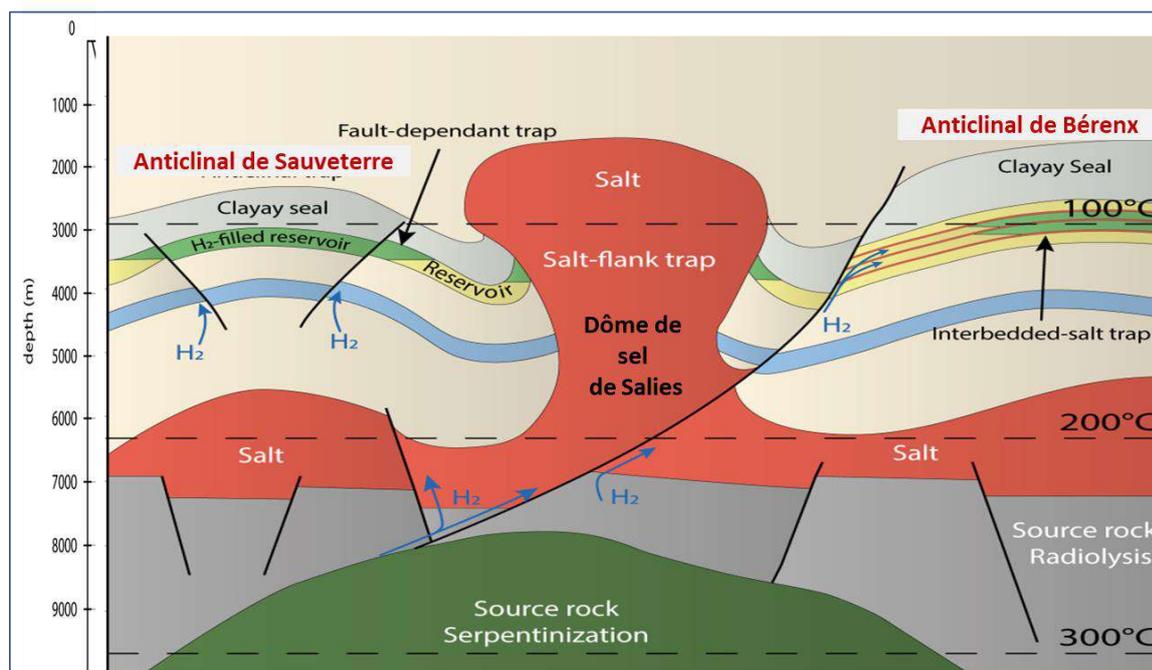


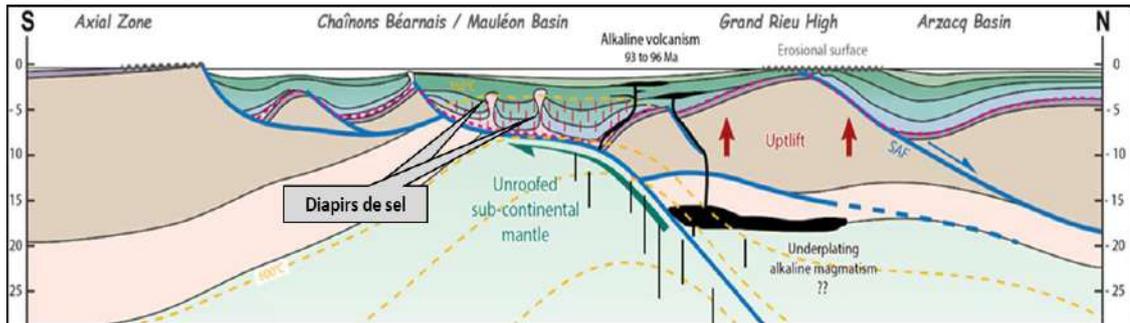
Schéma illustrant les pièges potentiels à hydrogène dans le secteur de Sauveterre de Béarn. D'après N Lefeuvre, thèse, Grenoble, 2022.

Commentaires de Géol Pyr

Ce schéma illustrant les pièges potentiels dans le secteur de Sauveterre de Béarn est irréaliste, en espérant qu'il ne servira pas aux nouveaux explorateurs d'hydrogène pour définir leur stratégie d'exploration !

- la base du sel est représentée par une géométrie en horst et graben (un horst sous le sel pouvant constituer à priori un piège intéressant pour l'hydrogène) comme si la phase de d'extension du rift, puis la compression pyrénéenne n'avaient eu aucun effet sur la base du sel. Par analogie, les bassins permien, comme celui bien connu de l'Anayet, étaient initialement des bassins d'effondrement, bordés par des failles d'extension, normales, mais qui ont été reprises en failles inverses lors de la phase pyrénéenne.

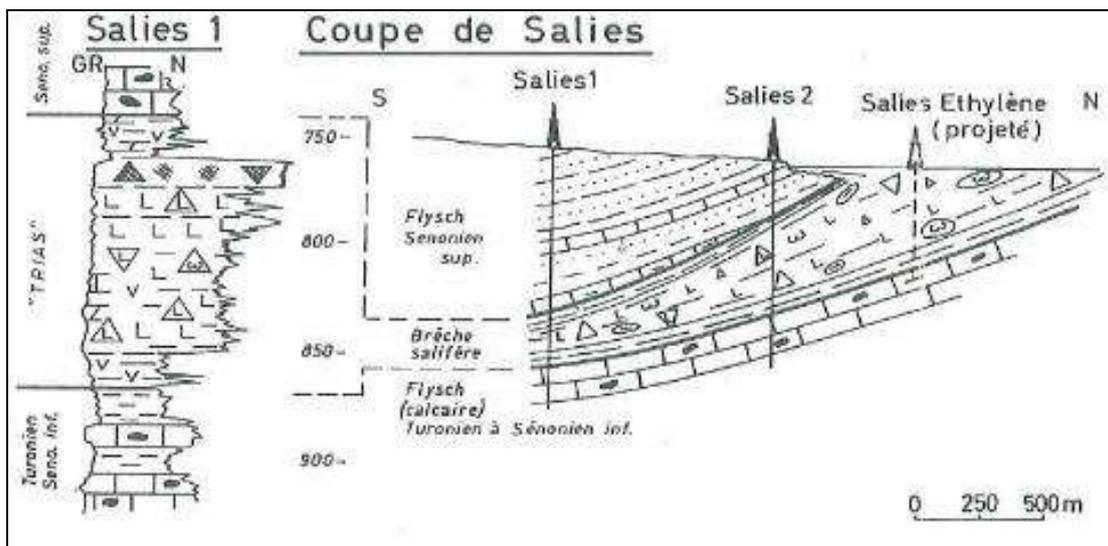
- couche de sel continue, sans trou dans le tapis de sel ? La seule voie de migration de l'hydrogène est donc via les chevauchements qui traversent le sel.
- il a existé de véritables diapirs de sel à la fin de l'épisode syn-rift (cf coupe ci-dessous) mais ces diapirs ont été en grande partie "détruits" lors de la phase pyrénéenne. De même la couche de sel continue au moment du dépôt, n'a probablement pas pu résister et rester continue au moment de la distension majeure (vers - 100 Ma) et de plus, le sel a été à nouveau mobilisé et injecté dans les chevauchements lors de la phase pyrénéenne. Dessiner une couche de sel continue est donc une aberration géologique et les trous dans le tapis de sel constituent des chemins de migration pour l'hydrogène, mais trop de trous dans le tapis augmente le risque de ne pas avoir, localement à la vertical d'un piège, une couverture étanche.

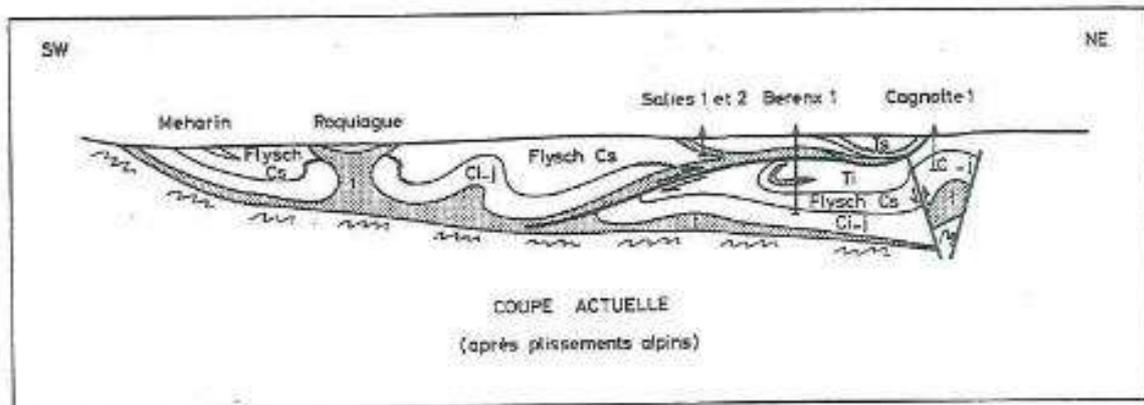


Coupe restaurée au Cénomanién, montrant la présence de deux vrais diapirs. D'après Thermal records of hyperextended rift – Pau - France – 9 & 10 February 2021

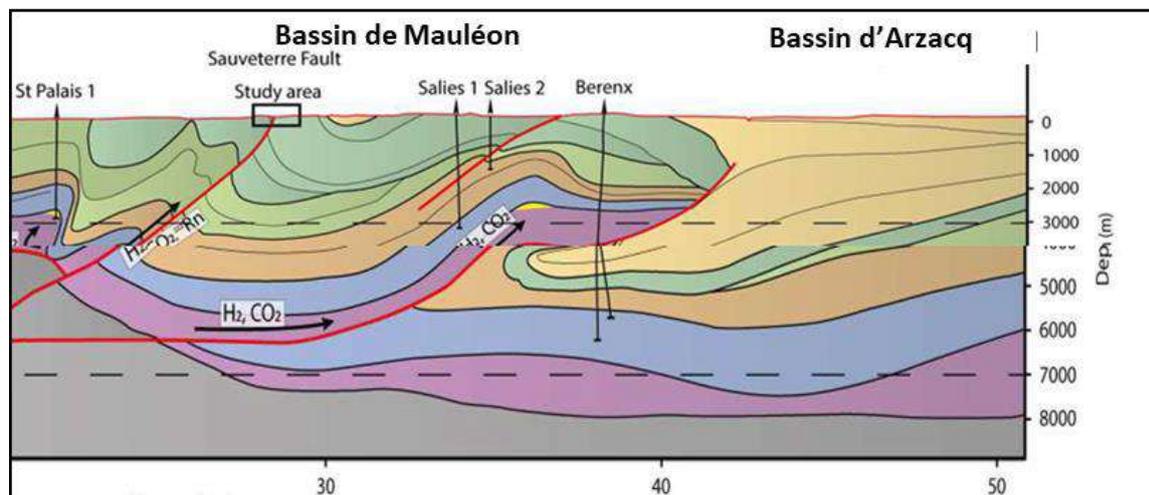
- les études terrain, la sismique et les données de puits montrent qu'actuellement il n'y a plus de diapir digne de ce nom dans le bassin de Mauléon, donc de là, à aller chercher des pièges potentiels, contre un diapir qui n'existe plus ! En effet, il n'y a pas de dôme de sel à Salies, mais une lame de sel triasique interstratifiée dans les niveaux du Crétacé sup qui affleure plus au nord et recoupée par les forages de Salies 1 et 2.
- concernant l'anticlinal de Bérenx, le flanc sud a été traversé par les puits de Salies-1 et 2; le flanc nord a été traversé 2 fois par les forages de Bérenx 1 et 2, opérés par Esso. Ces deux derniers puits ont prouvé qu'il s'agit d'un anticlinal chevauchant, correctement dessiné sur les coupes ci-dessous.
- quant à l'anticlinal de Sauvêtre, il est inconnu des géologues ayant travaillé des années sur ce secteur !!

Les coupes géologiques « vintages » de 1971, illustrent notre propos.





Sur le Trias re-sédimenté dans le sud-ouest du bassin aquitain. J. Henry et G. Zolnai, Bulletin Centre de Recherche Pau, SNPA, 5, 2, pages 389-398, sept 1971



Extrait d'une coupe géologique montrant les structures complexes reconnues par les forages de Salies et de Bérenx. G. Zolnai, 1973, reprise par Saspiturry et al., 2019.

6- 3-8 Les chemins de migration de l'hydrogène

Comme pour le système pétrolier, il est impératif de bien identifier les chemins de migration de la roche source vers la surface et surtout vers des pièges potentiels.

Les anomalies hydrogène détectées (cf. pages suivantes) dans les sols se localisent préférentiellement à l'aplomb du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen et de ses failles associées c'est-à-dire les chevauchements de Bellevue, Saint Palais, Sainte Suzanne. Ces failles de chevauchement enracinées dans le manteau seraient des conduits à priori privilégiés pour la migration de l' H_2 vers la surface, y compris en passant à travers les épaisses couches d'évaporites du Trias sup.

Mais pour former des accumulations d' H_2 , il est nécessaire que l' H_2 ne migre pas directement vers la surface. Il faut alors imaginer des chemins de migration plus complexes à travers des formations même peu poreuses et peu perméables, associées ou non à des failles.

En plus des failles de chevauchements, en tant que drains pour l'hydrogène à travers les niveaux salifères, on pourrait imaginer des zones où le sel serait absent et par où l'hydrogène pourrait passer. Les fameux trous dans le tapis de sel déjà décrits précédemment. Par contre pour un piégeage efficace de l'hydrogène sous le sel, il faut que le piège soit bien couvert par le sel pour assurer son étanchéité, c'est dire sans trop de trous dans le tapis de sel.

6-3-9 Les Indices de surface

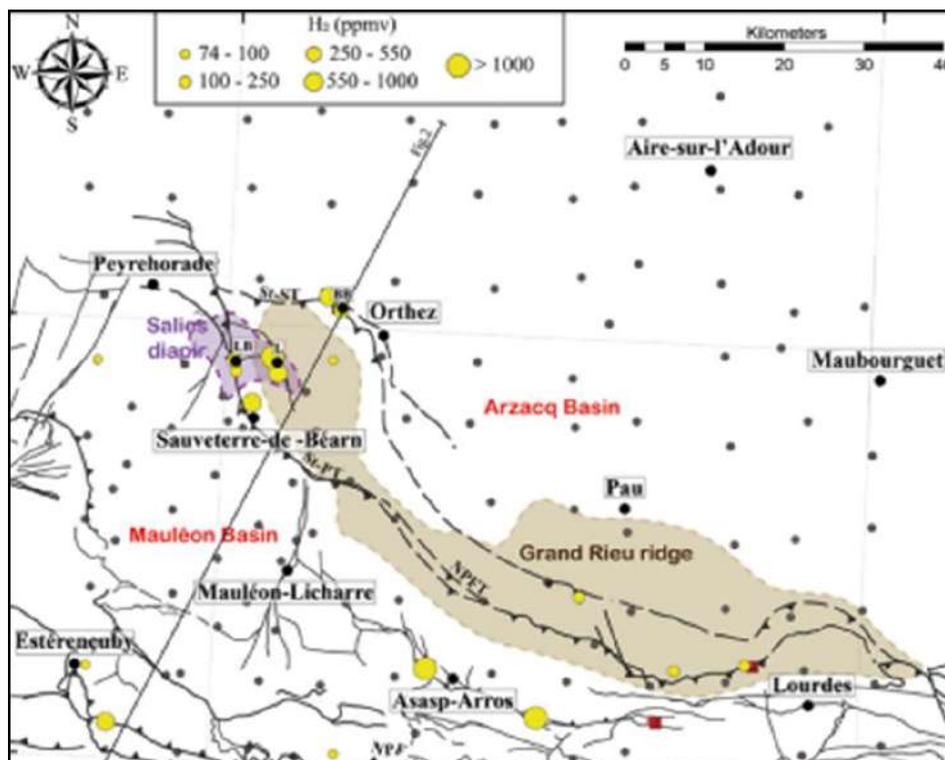
La présence d'indices d'hydrogène en surface constitue un élément important du système hydrogène, car ils prouvent qu'un système de génération de l'hydrogène fonctionne en profondeur, mais sans pour autant savoir s'il existe des accumulations ou flux exploitable commercialement, car ces émanations en surface prouvent justement que l'hydrogène est capable d'arriver en surface sans avoir été retenu dans un piège se trouvant sur les chemins de migration de l'hydrogène.

A notre connaissance, en 2020-2022, c'est la première fois qu'une étude et mesures dans les sols de l'hydrogène et gaz connexes a été réalisée dans le piémont pyrénéen dans le cadre de la thèse de N. Lefeuvre.

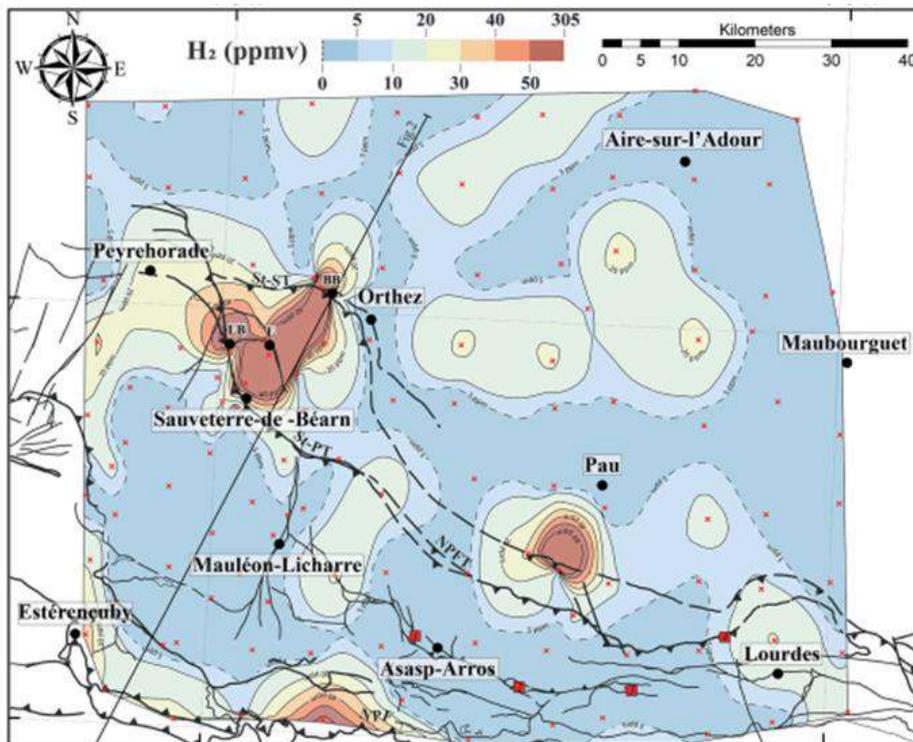
La zone initiale étudiée s'étendait sur 7 300 km² (90 X 80 km) dans la Zone Nord Pyrénéenne, se focalisant sur le bassin de Mauléon, le sud du bassin d'Arzacq et le la ride de Grand Rieu qui sépare ces deux bassins. 1106 mesures de gaz dans le sol, répartis sur 131 sites (avec 7 mini-puits sur chaque site couvrant environ 100 m² pour tenir compte des fluctuations de chaque point d'échantillonnage). La grille de prélèvement initiale était d'environ 10 X 10 km. Les gaz analysés étaient : H₂, CO₂, CO, CH₄, O₂, ²²²Rn (Rn = radon un gaz radioactif avec émission de rayonnement alpha).

Les anomalies d'H₂ se corrèlent relativement bien avec les anomalies de CO₂ et de Radon et semblent toutes associées à la présence de failles de chevauchement émergeant en surface. Ceci conforte le scénario de migration de ces gaz le long des failles, où le CO₂ joue le rôle de « transporteur » pour les deux autres gaz à partir de sources profondes. A noter que l'H₂ peut migrer indépendamment des deux autres gaz, à cause de la plus petite taille de la molécule d'hydrogène et de sa grande capacité de diffusion.

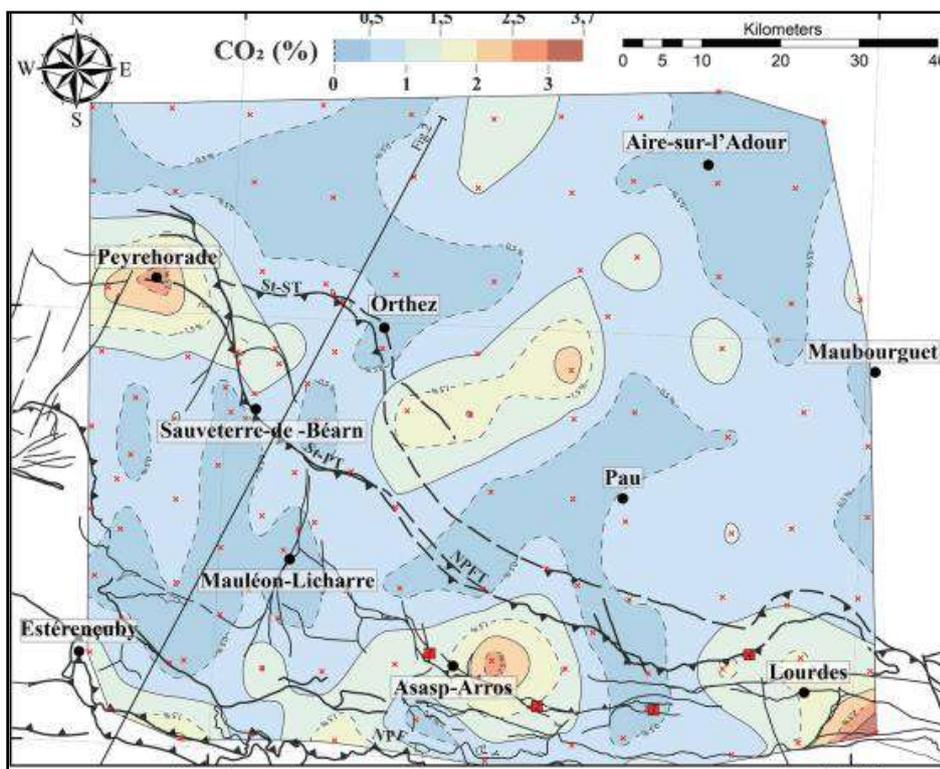
Pour le radon, il a déjà été prouvé ailleurs, que le radon est un bon marqueur pour identifier les systèmes hydrothermaux et détecter des failles actives. Par conséquent de fortes concentrations en radon, corrélées avec de fortes concentrations en hydrogène et gaz carbonique au dessus du soi-disant diapir de Salies de Béarn et le long du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen au niveau de Sauveterre de Béarn et une preuve supplémentaire de l'existence de circulations actives de fluides dans des formations géologiques profondes.



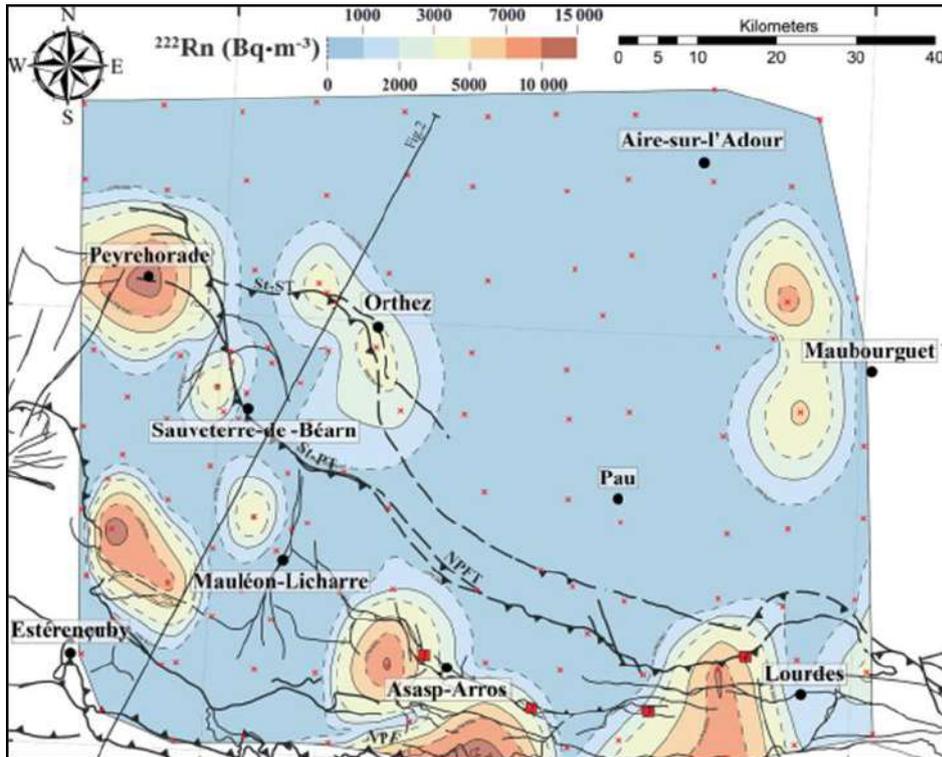
Carte des prélèvements de gaz dans les sols (points noirs selon une grille d'environ 10 X10 km). A noter la présence de plusieurs points anomaux (points jaunes) à proximité de Sauveterre de Béarn, mais surtout du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen. A noter des « hot-spots » dépassant les 1000 ppmv, pour un « cut off » pour les anomalies de 74 ppmv. A noter l'absence d'anomalie dans le bassin d'Arzacq sud. A noter aussi d'autres anomalies vers Asaps-Arros associées à un autre chevauchement, mais à vergence sud. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.



Concentration d' H_2 dans les gaz prélevés dans les sols, mais présentés sous forme de contours. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.

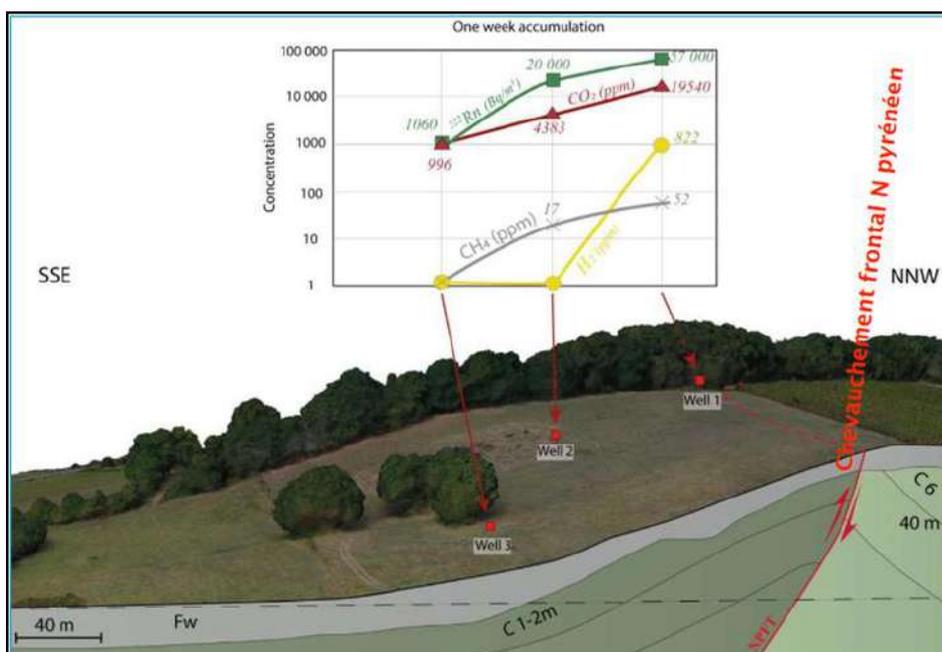


Concentration de CO_2 dans les gaz prélevés dans des sols. A noter que les anomalies CO_2 ne se superposent pas exactement avec les anomalies d' H_2 , mais restent associées à des chevauchements. A noter des hot-spots dépassant 10.5 % de CO_2 pour un cut-off de 3 %. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.



Concentrations de Radon (un gaz radioactif) prélevés dans les gaz des sols. A noter, des anomalies dépassant 57 300 Becquerel/ m^3 pour un cut-off anomalique à 4 200 Bq/m^3 . A noter que les anomalies de Radon ne se superposent pas exactement avec les anomalies d' H_2 , mais restent associées à des chevauchements. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.

En 2018-2021, lors de la thèse de N. Lefeuvre, des études des sols plus détaillées ont été entreprises à 1 km au N de Sauveterre de Béarn et se focalisant sur le FCNP. Ces études démontrent que les concentrations des gaz le plus élevées sur le chevauchement, prouvant ainsi que le FCNP constitue un chemin préférentiel de migration de l'hydrogène vers la surface.



Concentration des gaz du sol en H_2 , CH_4 , CO_2 , ^{222}Rn , suivant deux profils focalisés sur l'émergence en surface du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen, près de Sauveterre de Béarn. D'après N. Lefeuve, thèse Grenoble, 2022.

La présence d'hydrogène dans les sols à proximité de l'émergence de chevauchements importants s'enracinant en profondeur, peut être considérée comme un indicateur de l'existence d'un système hydrogène en fonctionnement. Mais il faut prendre des précautions ; tout d'abord s'assurer qu'il s'agit d' H_2 d'origine profonde et non pas créée par des processus chimiques superficiels. C'est là que des gaz associés prouvant une origine profonde ont leur importance.

Par ailleurs il est facile de fabriquer quelques dizaines de ppm d' H_2 par friction d'outils métalliques avec les roches. Il a été prouvé que l'utilisation d'outils métalliques d'échantillonnage de gaz dans les sols pouvait générer de l'hydrogène. Il faut alors vérifier que ces émanations sont persistantes dans le temps, même si elles fluctuent et ne correspondent pas à un biais d'échantillonnage (cas de la faille vosgienne).

Des analyses isotopiques des gaz (CO_2 , CH_4) et de gaz rares (He, Ar, Kr) ont été réalisées dans le cadre d'un monitoring des gaz du sol afin de mieux contraindre la source de cette hydrogène natif détecté en surface, ce qui nous amène au paragraphe plus général, suivant :

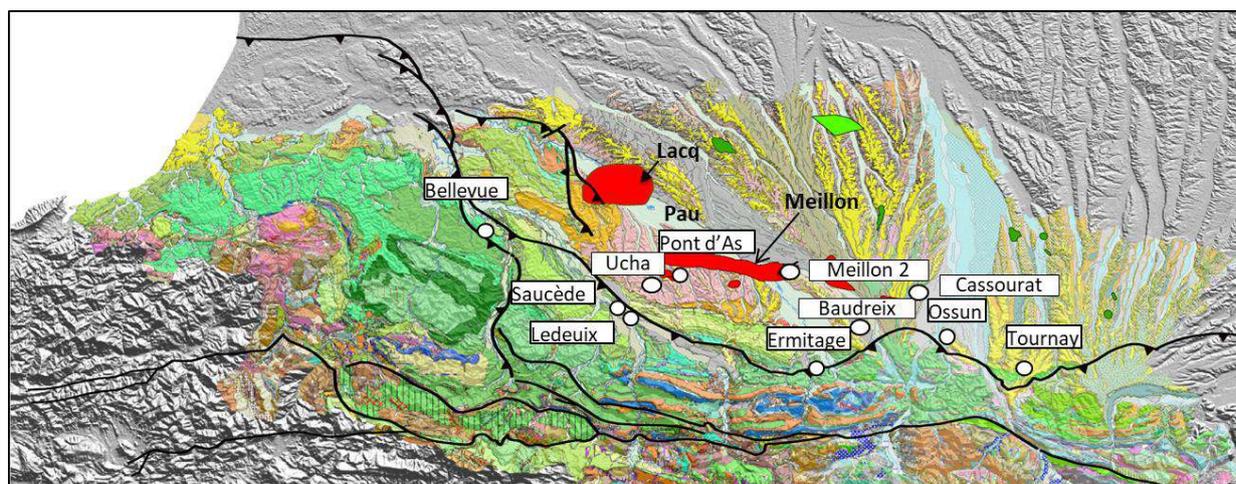
Relations entre H_2 , CH_4 et CO_2

Il était communément admis que le méthane trouvé dans les gisements du bassin d'Aquitaine avait une origine thermogénique (c'est-à-dire formé à partir d'une roche mère sédimentaire contenant du carbone qui, sous l'effet de la température, génère des hydrocarbures). C'est le cas des gisements de Saint Marcet, Lacq, Meillon, Saint Faust, Rousse, le Lanot. Mais surprise, des analyses isotopiques sur certains gaz de quelques gisements ou indices de méthane (Saucède, Bellevue, Ermitage, Pont d'Aspe, Ucha, Ledeuix, etc) montreraient une part d'origine abiotique (c'est-à-dire sans présence ou sans intervention de la vie, donc sans matière organique).

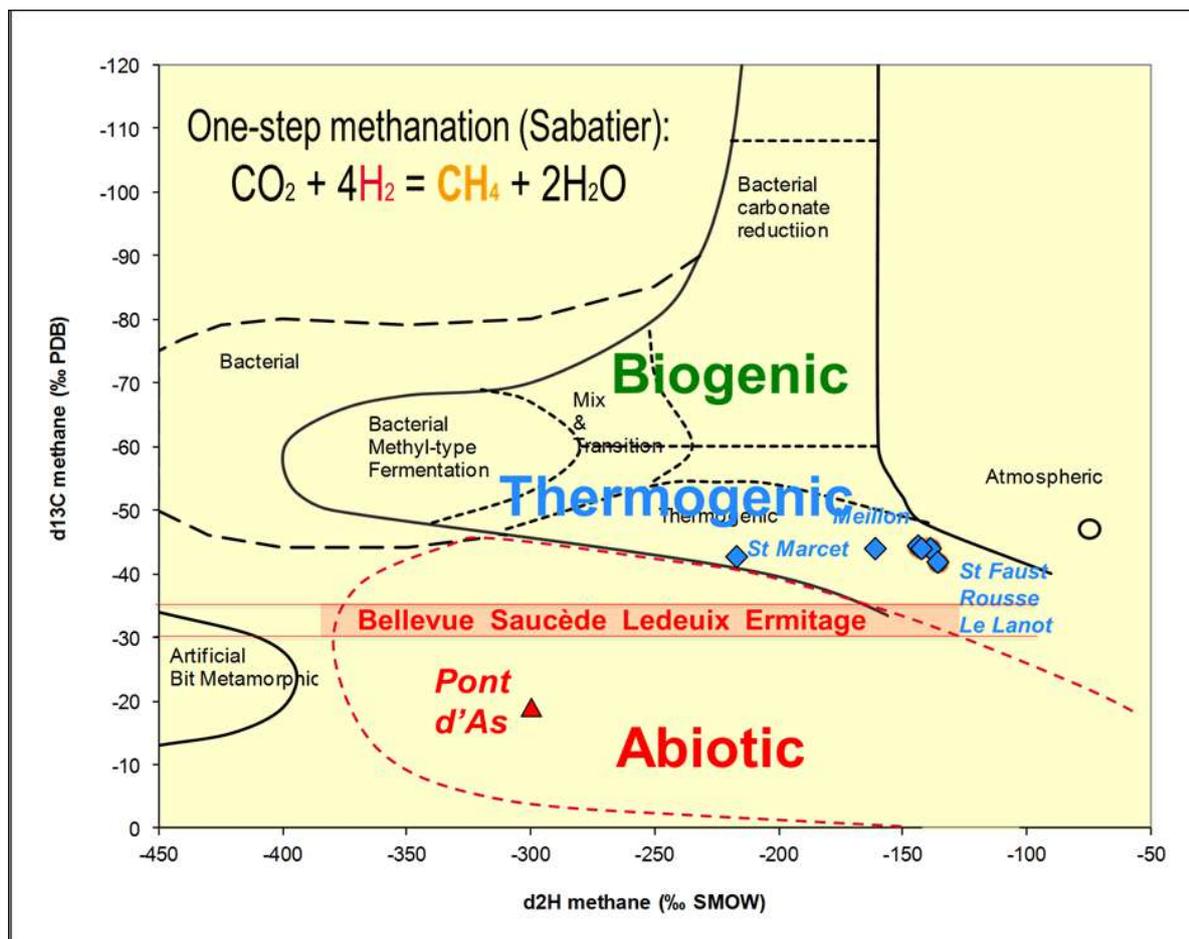
Rappelons qu'on peut générer du méthane abiotique par réaction chimique entre le CO_2 et l' H_2 , suivant la réaction, en une étape de méthanisation, dite de Sabatier :



Donc, il faut de l'hydrogène pour que cette réaction chimique fonctionne, ce qui nous intéresse évidemment au plus haut point !

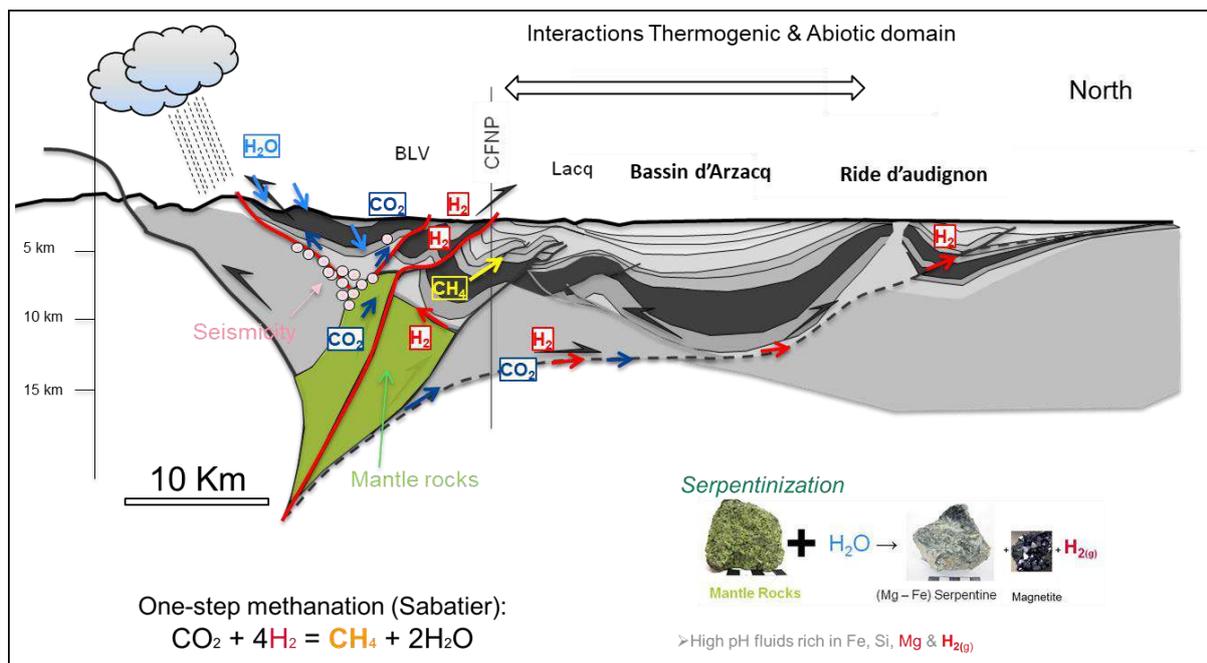


Carte des gisements et indices de méthane ayant (parfois seulement en partie) une signature isotopique indiquant une origine abiotique pour le méthane. D'après S. Calassou et al, Native H_2 seeps in the NW Pyrénées. An active mantle reactor factory ? Présentation RST, Lille, 2018.



Signatures isotopiques du méthane, permettant de différencier l'origine biogénique, thermogénique et abiotique du méthane dans le bassin d'Aquitaine. D'après S. Calassou et al, *Native H₂ seeps in the NW Pyrénées. An active mantle reactor factory ?* Présentation RST, Lille, 2018.

Cette présence plutôt inattendue de méthane abiotique, révélant la présence d'hydrogène pour la réaction chimique de Sabatier, conduit à imaginer un système géochimique qui à partir de l'hydrogène généré par serpentinisation du manteau, entrerait en réaction avec le CO₂, pour générer du méthane abiotique en profondeur, qui viendra se mêler ou non avec le méthane thermogénique généré « classiquement » à partir de la roche mère jurassique. Ce système géochimique peut se résumer par le schéma suivant ou système H₂ natif, système génératif de méthane abiotique, et système pétrolier classique, s'entremêlent.



Coupe schématique illustrant l'interaction entre le système hydrogène natif, la génération de méthane abiotique et le mélange avec le système pétrolier classique du bassin d'Arzacq. A noter l'hypothèse de la migration longue distance (> 40 km) de l'hydrogène vers le nord, vers la ride d'Audignon. Intéressant mais reste à le prouver ? CFNP = Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen, frontière entre le bassin d'Arzacq au nord et le bassin de Mauléon au sud. BLV = Bellevue. D'après S. Calassou et al, Native H₂ seeps in the NW Pyrénées. An active mantle reactor factory ? Présentation RST, Lille, 2018.

7 - Bilan du système pétrolier du bassin de Mauléon et conséquences pour le potentiel du système hydrogène

Avant de faire le bilan sur le système hydrogène dans le bassin de Mauléon (et éventuellement dans les chaînons béarnais, où 2 nouveaux PER ont été demandés) Il faut se poser trois questions toutes simples, mais pourtant fondamentales :

- pourquoi tous les forages pétroliers (une dizaine) dans le bassin de Mauléon ont tous été des échecs, ce qui contraste avec les succès du bassin d'Arzacq voisin ?
- et par voie de conséquence, qu'est ce qui n'aurait pas fonctionné dans ce système pétrolier du bassin de Mauléon ?
- quelles sont alors les conséquences pour le système hydrogène dans le bassin de Mauléon avec la nécessité de bien évaluer les risques des cibles potentielles ?

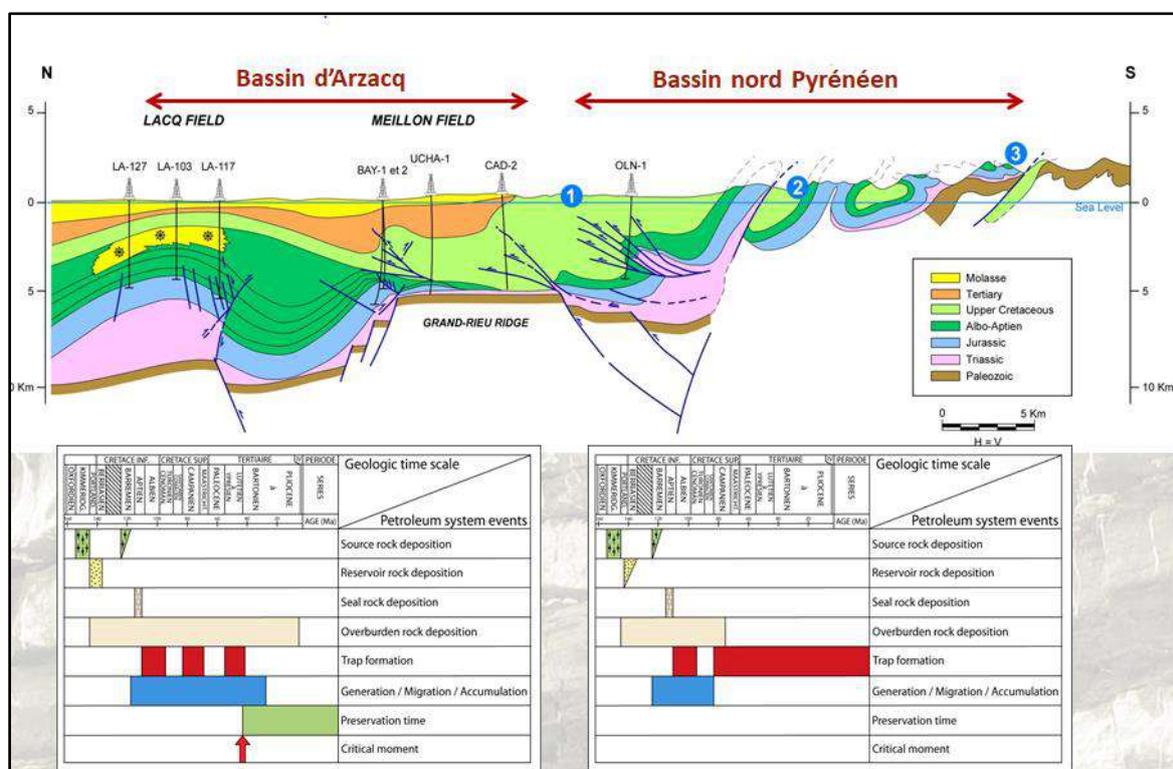
La figure ci-dessous illustre bien les deux premières questions. La coupe géologique permet de comparer le bassin d'Arzacq et le bassin dit « Nord Pyrénéen » auquel appartient le bassin de Mauléon et les chaînons béarnais.

Les deux tableaux suivants sont une sorte de chartre souvent utilisée par les explorateurs pétroliers pour présenter et résumer les éléments, les processus et la chronologie des événements d'un système pétrolier.

Pour le bassin d'Arzacq, on peut constater que tout fonctionne bien. La roche-mère s'est déposée juste avant les roches réservoirs et cette proximité géologique favorise les migrations sur une courte distance. La couverture s'est déposée après les réservoirs. Les divers épisodes de génération des hydrocarbures (= le moment critique) s'effectue alors que les pièges se forment facilitant le remplissage de ces pièges en hydrocarbures, les pièges sont ensuite préservés jusqu'à nos jours.

Pour le bassin Nord Pyrénéen, ce n'est pas du tout la même histoire. Alors que le bassin d'Arzacq était relativement préservé de la tectonique pyrénéenne, le bassin nord pyrénéen, correspondant grosso modo à la Zone Nord Pyrénéenne dans la partie ouest des Pyrénées, a subi de plein fouet les

mouvements tectoniques de cette phase pyrénéenne jusqu'à la fin du Miocène. En conséquence les pièges essentiellement structuraux n'ont pas résisté à tous ces mouvements tectoniques et n'ont pas pu conserver les hydrocarbures, si hydrocarbures il y avait. C'est-à-dire que les gisements d'hydrocarbures plus ou moins anciens, s'ils ont existé dans le passé lointain, n'ont pas pu être préservés jusqu'à nos jours.



Comparaison entre le système pétrolier du bassin d'Arzacq et le système pétrolier nord pyrénéen, applicable au bassin de Mauléon. Coupe initiale de L. Moen-Maurel, 1991. D'après J. Mouillac et JM Flament, geological field trip guide-book, Escuret Peak, Total, 2017

Quelles sont les conséquences des résultats pétroliers pour le système hydrogène du bassin de Mauléon ?

La génération et la migration de l'hydrogène vers des pièges potentiels est très récente et en flux continu actuel. Mais dans quel état sont ces pièges potentiels après les divers épisodes tectoniques de la phase pyrénéenne ? Probablement en « piteux état » et pas très efficaces puisqu'ils n'ont pas pu retenir les hydrocarbures, s'ils en contenaient dans le passé. C'est le principal risque pour tous les pièges post-salifères associés directement ou indirectement aux failles de chevauchements. Ce risque est encore plus prononcé pour les chaînons béarnais qui sont ont été encore bien plus affectés par la tectonique pyrénéenne que le bassin de Mauléon, qui a subit « seulement » une inversion tectonique.

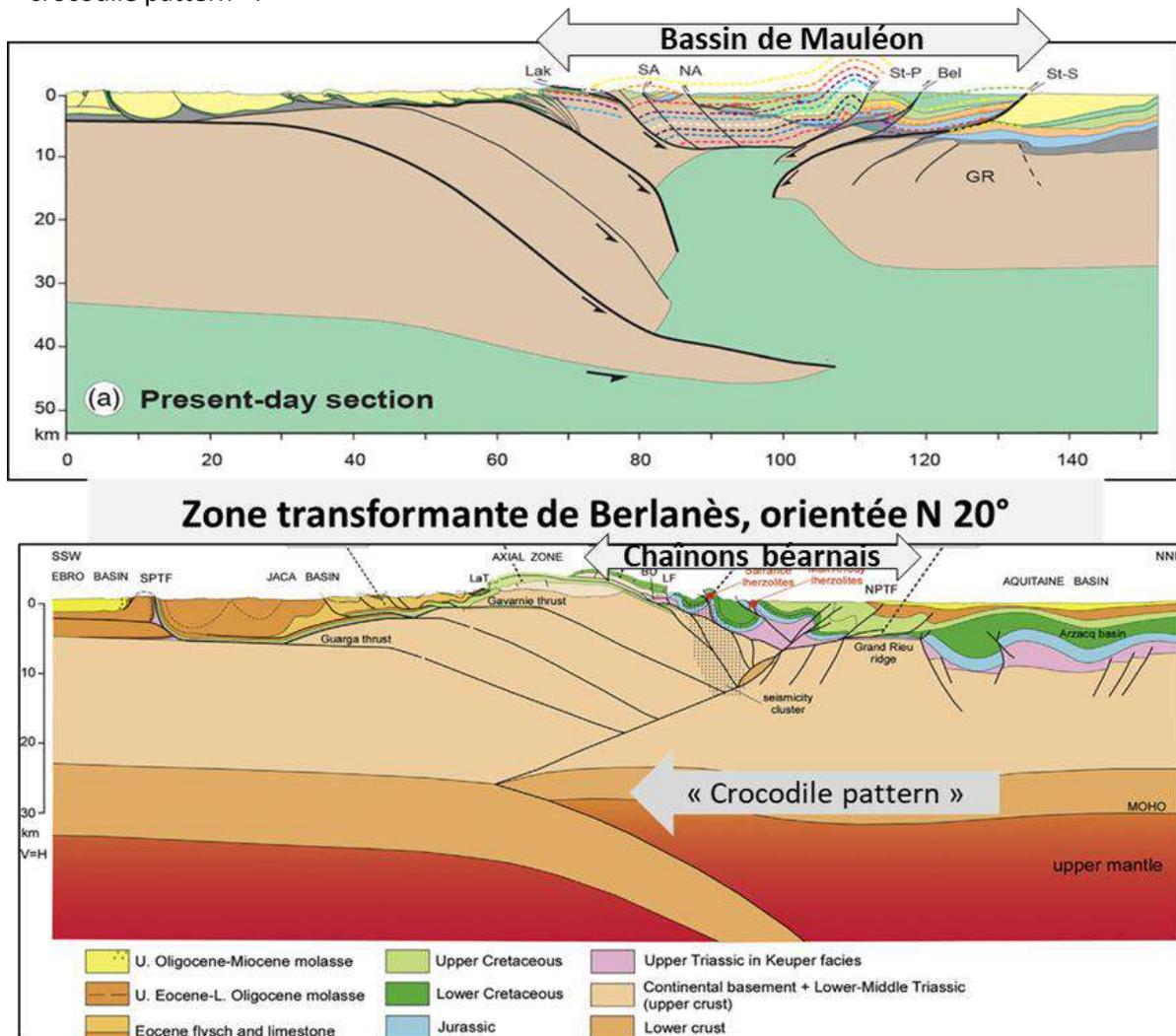
Les pièges anté-salifères sont à priori moins concernés, donc moins risqués, car les épaisses couches d'évaporites par leur nature plastique, sont plus aptes à « encaisser » les mouvements tectoniques sans trop se déformer et donc à conserver leur qualité d'étanchéité et de rôle d'écran imperméable à la dimigration actuelle de l'hydrogène.

En conclusion au point de vue exploration pour l'H₂, les pièges anté-salifères sont beaucoup moins risqués que les objectifs classiques post-salifères, même s'il subsiste des incertitudes quant à la qualité des réservoirs du Trias inférieur sous le sel.

Potentiel hydrogène des chaînons béarnais

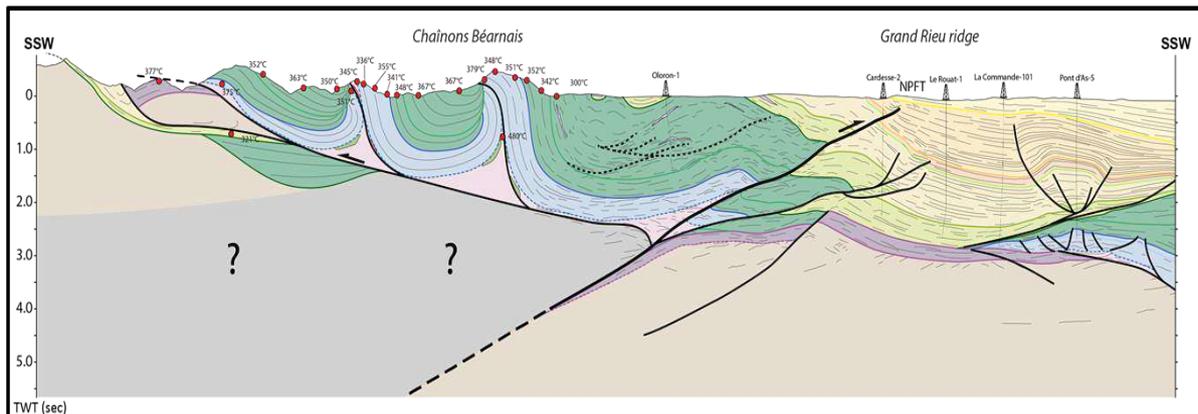
Le bassin de Mauléon et chaînons béarnais appartiennent tous deux à la Zone Nord Pyrénéenne, mais avec des différences notables, ayant des conséquences sur leurs potentiels hydrogène respectifs.

Tout d'abord, les structures profondes sont différentes de part et d'autre de la zone transformante de Berlanès qui sépare ces deux domaines. Le manteau est bien plus profond dans les chaînons béarnais (~ 25 km à comparer aux ~ 10 km dans le bassin de Mauléon) et la suture entre les 2 plaques européenne et ibérique comporte une sorte de poinçonnement de la plaque européenne dans la plaque ibérique, comme une gueule grande ouverte d'un crocodile, ce qu'on qualifie de « crocodile pattern ».



Deux coupes géologiques, orientées N20°, et situées de part et d'autre de la zone transformante de Berlanès, montrant des structures profondes très différentes. Coupe supérieure passant par le bassin de Mauléon, à l'ouest de la zone transformante de Barlanès (le manteau est environ 10 km de profondeur) et la coupe inférieure à l'est de la zone transformante de Barlanès, passant dans domaine des chaînons béarnais (manteau à environ 25 km de profondeur). D'après Saspiturry et al, 2019 et Teixell et al, 2016.

Les chaînons béarnais sont bien plus compliqués au point de vue tectonique que le bassin de Mauléon, avec plis et chevauchements qui ne sont guère appropriés pour jouer leur rôle de pièges pour l'hydrogène. Le sel est impliqué et mobilisé dans ces structures et n'est donc pas continu pour assurer un écran efficace à la migration de l'hydrogène pour créer des pièges valables anté-salifères. Pour l'instant il n'y a pas de preuve d'émanation d'hydrogène en surface, ce qui viendrait confirmer qu'un système hydrogène fonctionne dans ce secteur. Mais les travaux de prospection dans les PER de Grand Rieu et Couroucou permettront peut être d'apporter prochainement de bonnes nouvelles sur ce sujet. Lisez la République des Pyrénées !

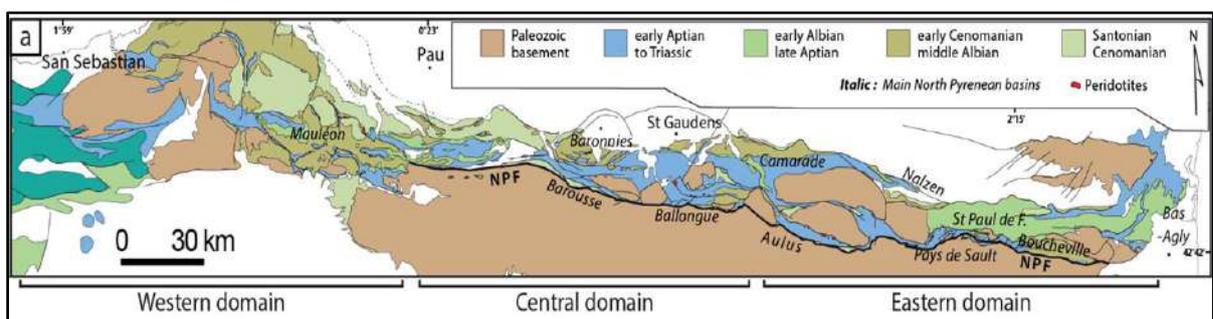


Coupe géologique à travers les chaînons béarnais (PER de Couroucou), montrant la complexité des structures tectoniques, avec du sel triasique discontinu, impliqué dans les structures tectoniques créant ainsi des trous dans le tapis de sel. D'après Ducoux, présentation « Thermal records of hyperextended rift – Pau - 9 & 10 February 2021

7- Potentiel hydrogène du bassin des Baronnies/ Comminges , au nord de St Gaudens

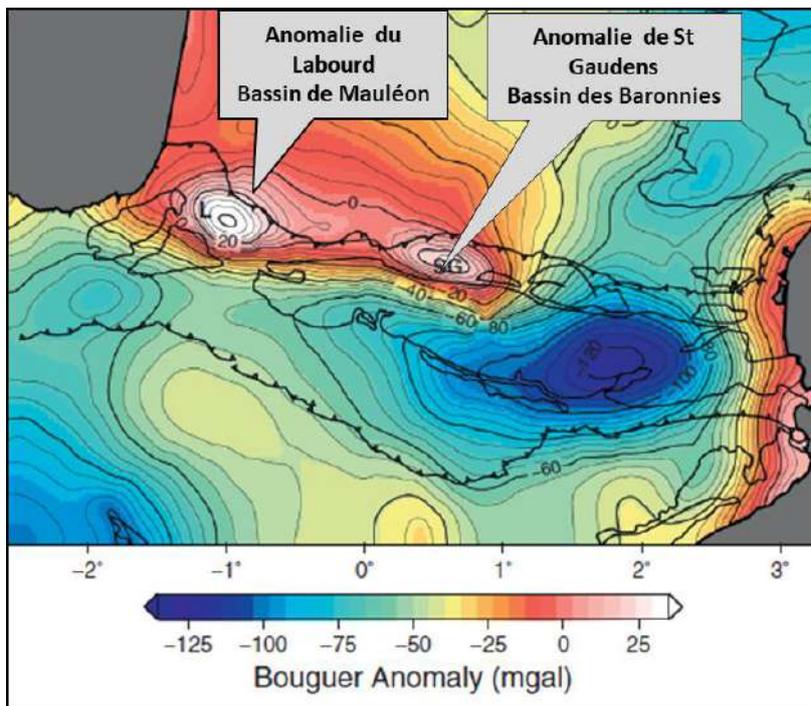
Pourquoi ne pas aller prospecter pour l'hydrogène dans le bassin des Baronnies, où existe une anomalie gravimétrique, positive, dite de Saint Gaudens, similaire à celle du Labourd, sous le bassin de Mauléon. Ce bassin avec plusieurs autres bassins (Lourdes-Bagnères, Camarade, la Ballongue, Aulus, Quillan, etc) font partie du même ensemble géologique ayant connu la même évolution sédimentaire et structurale.

Une demande de PER, a été demandée par les sociétés iséroises Mantle8 et G&OL sur une zone couvrant ce bassin au nord de St Gaudens. Cf. chapitre suivant.

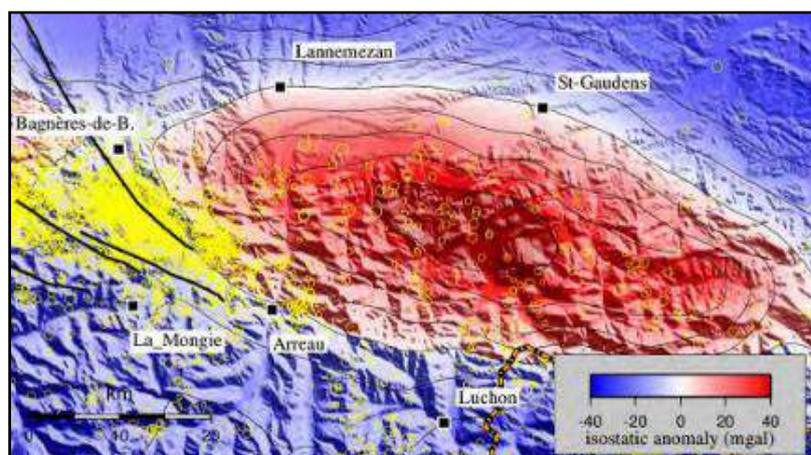


Carte géologique des bassins Crétacé jalonnant l'ancien rift, sillon flysch, long de la Zone Nord Pyrénéenne, en particulier le bassin des Baronnies/Comminges, présentant des similitudes avec le bassin de Mauléon pour la prospection hydrogène. D'après Clerc et al, 2015

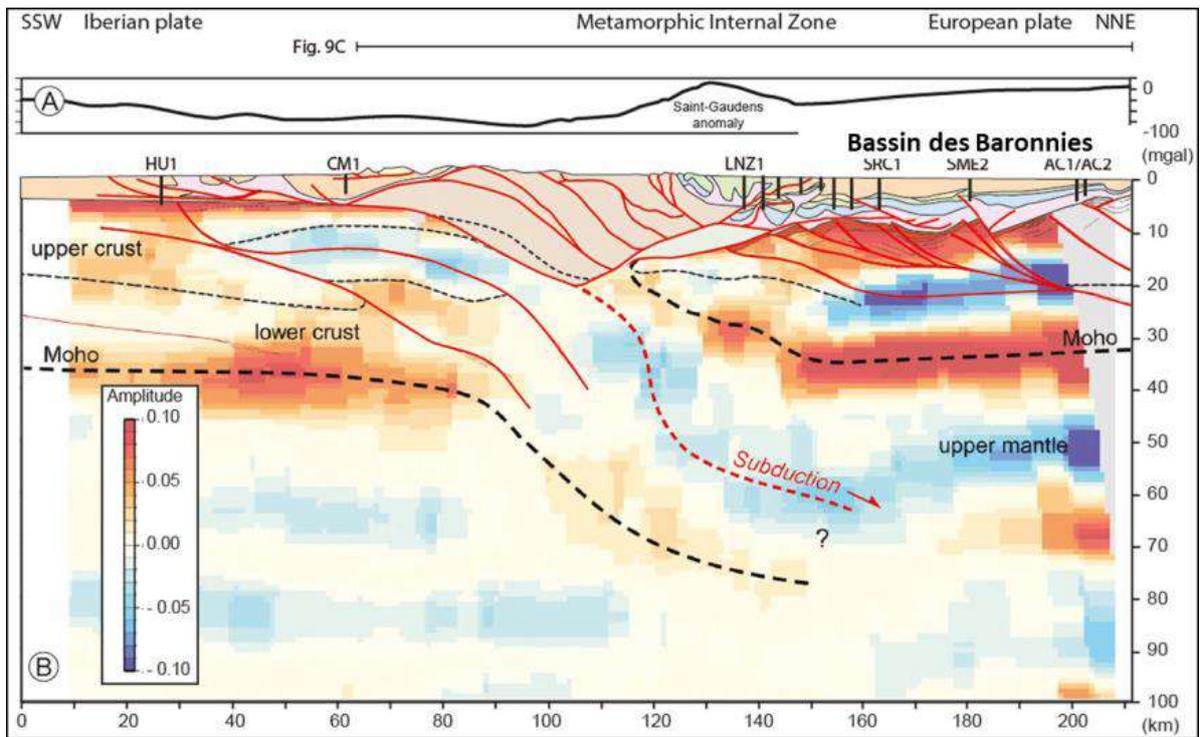
L'anomalie gravimétrique positive, dite de St Gaudens, est située à l'aplomb du bassin sédimentaire des Baronnies-Comminges. Les études fines du champ de gravité des Pyrénées, révèle la présence d'une anomalie positive majeure dans cette zone. Cette anomalie trahit l'existence d'un important excès de masse dans le sous-sol, lui même très probablement dû à la présence d'un corps dense de grandes dimensions, « enchassé » dans la croûte terrestre. Les connaissances actuelles sur la formation des Pyrénées expliquent ce corps dense comme une remontée du manteau à la faveur de la phase d'extension crustale lors de l'épisode de rifting albien. Ce corps, ultérieurement lors de la phase de compression pyrénéenne, sera poussé vers le nord, sur le sud du bassin d'Aquitaine, via le Front de Chevauchement Nord Pyrénéen, pour se trouver dans sa position allochtone actuelle. Profondeur de 8 à 16 km ?



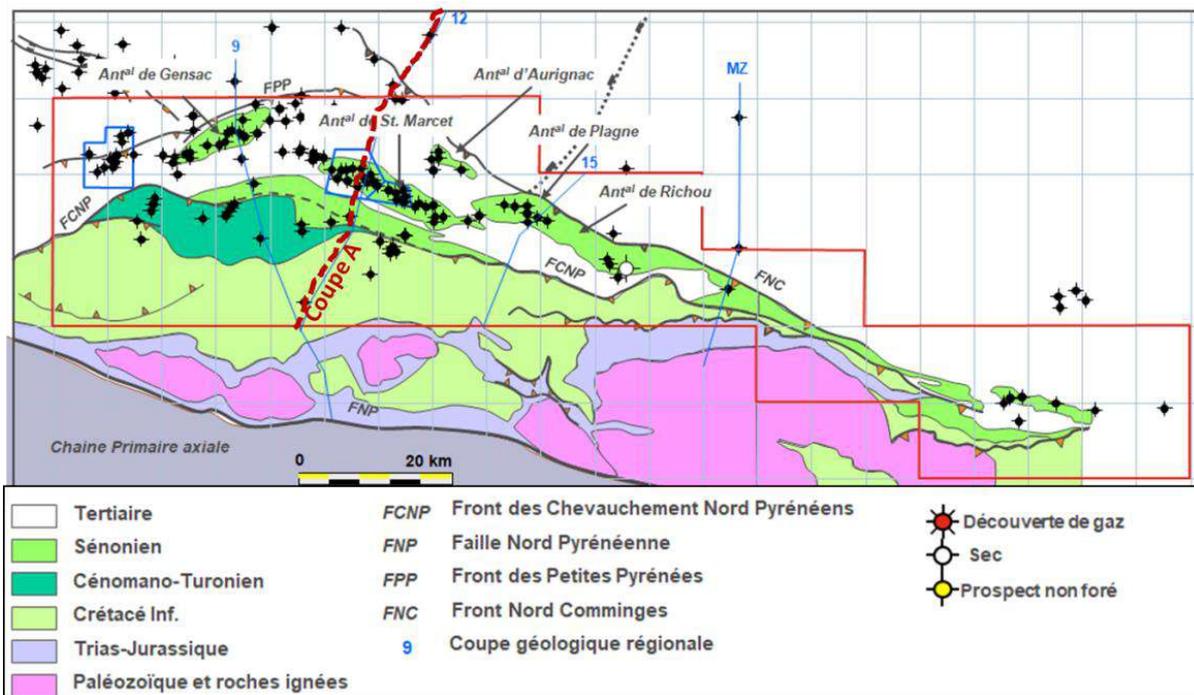
Carte gravimétrique, anomalie de Bouguer, corrigée de la contribution des racines crustales et des sédiments. D'après Saspiturry et al 2019



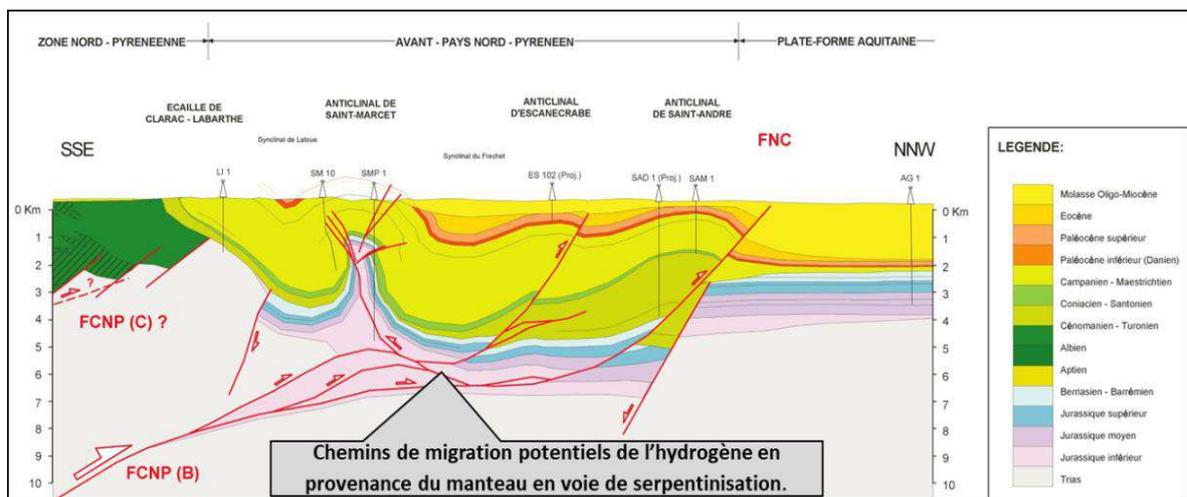
Zoom sur l'Anomalie gravimétrique positive de St Gaudens, en contours rouges. D'après publication Expérience PICSO du réseau de surveillance de la sismicité des Pyrénées. Projet d'imagerie sismologique du Comminges, avril 2024



Anomalie de Bouguer (d'après Espurt et al, 2019) montrant la présence sous le bassin des Baronies d'un corps allochtone composé de roches du manteau, résultant en une anomalie positive (en rouge). Forages pétroliers du bassin des Baronies : Lannemezan 1 (LNZ1), Sarrac 1 (SRC-1), Saint Médard 2 (SME-2), Auch 1 (AC-1) and Auch 2 (AC-2). D'après Saspiturry et al 2019.



Carte géologique schématique du bassin des Baronies/Comminges avec la localisation des anciens puits d'exploration pétrolière et la localisation de la coupe géologique A (cf. figure suivante). A noter que la majorité des puits pétroliers qui ont conduit à plusieurs découvertes (dont celle de St Marcet) ne sont pas situés dans la Zone Nord Pyrénéenne ce qui correspond à l'avant pays nord-pyrénéen (c'est-à-dire entre Faille Nord Pyrénéenne et Front de Chevauchement Nord pyrénéen) mais dans ce qu'on appelle les Petites Pyrénées (entre Front de chevauchement Nord Pyrénéen et Front des Petites Pyrénées) qui chevauchent sur le sud du bassin d'Aquitaine. Doc Total, courtoisie de JJ. Biteau.



Coupe géologique A, équilibrée, régionale, de direction SSE-NNW et transverse au bassin du Comminges. A noter la nature allochtone de ce bassin « sur le dos » du Front de chevauchement des petites Pyrénées. Tous les chevauchements s'enracinent en profondeur et sont donc susceptibles d'être des chemins de migration potentiels pour l'hydrogène en provenance du manteau en voie de serpentinisation. Auteur L. Moen-Maurel, Doc. Total, courtoisie de JJ. Biteau.

D'un point de vue géologique on retrouve des similitudes intéressantes avec le bassin de Mauléon :

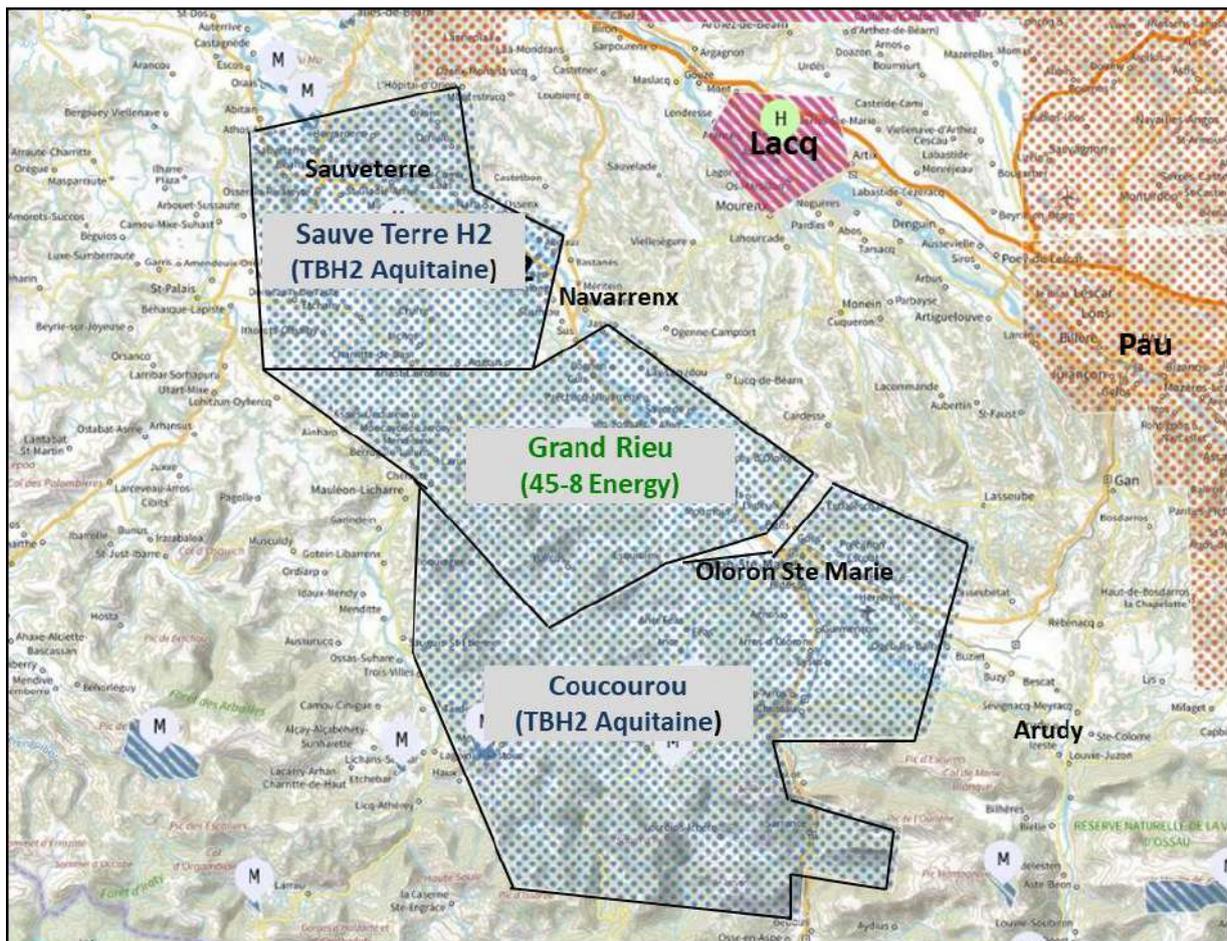
- structures complexes associées au Front de Chevauchement Nord Pyrénéen et ses fronts associés comme le Front des petites Pyrénées
- failles de chevauchement qui s'enracinent en profondeur et qui pourraient constituer des chemins de migration potentiels pour l'hydrogène à partir d'un manteau en voie de serpentinisation situé entre 8 et 16 km de profondeur
- de nombreux puits pétroliers ont été réalisés dans ce secteur avec des succès contrairement au bassin de Mauléon, ce qui démontre que le système pétrolier a bien fonctionné dans ce bassin.
- mais toutes les structures intéressantes les plus évidentes ont déjà été forées (même s'il en resterait quelques unes de non forées ?). Il n'y a pas d'hydrogène dans le gisement de St Marcet et la présence d'hydrogène n'a pas été signalée dans les anciens puits. (A une exception près ? mais à vérifier). Cela voudrait dire que l'hydrogène n'est pas parvenu dans les pièges pétroliers, qui eux ont pourtant fonctionné pour piéger le méthane.
- on peut espérer que l'hydrogène, si génération d'hydrogène en profondeur il y a, est resté piégé sous les évaporites du Trias Sup. Cependant, le sel est souvent mobilisé et il impliqué dans certaines structures. Cela augmente le risque de ne pas avoir des formations évaporitiques continues et étanches qui assurent une bonne couverture (les fameux trous dans le tapis de sel). Ces cibles hydrogène sous le sel triasique constituent les seuls objectifs sérieux et les moins risqués de ce bassin du Comminges
- à ce stade, nous ne savons pas si des analyses de gaz dans les sols ont été effectuées dans les zones d'émergence des fronts de chevauchement, qui en cas de résultats positifs, démontrerait qu'un système hydrogène est en fonctionnement et réduirait les risques d'exploration pour l'hydrogène. Paraît qu'il existerait des ronds de sorcières dans le Comminges ? Reste à les trouver d'après les photos satellites de Google Earth. Si vous en détectez, nous sommes preneurs de cette information.
- l'exploration de l'hydrogène dans ce bassin comporte les deux mêmes handicaps que dans le bassin de Mauléon : la difficulté de bien imager la base du sel en sismique pour bien identifier des pièges structuraux potentiels et la profondeur des objectifs synonymes de coûts élevés pour les forages.

8 - Les Permis Exclusifs de Recherche (PER) hydrogène dans les Pyrénées

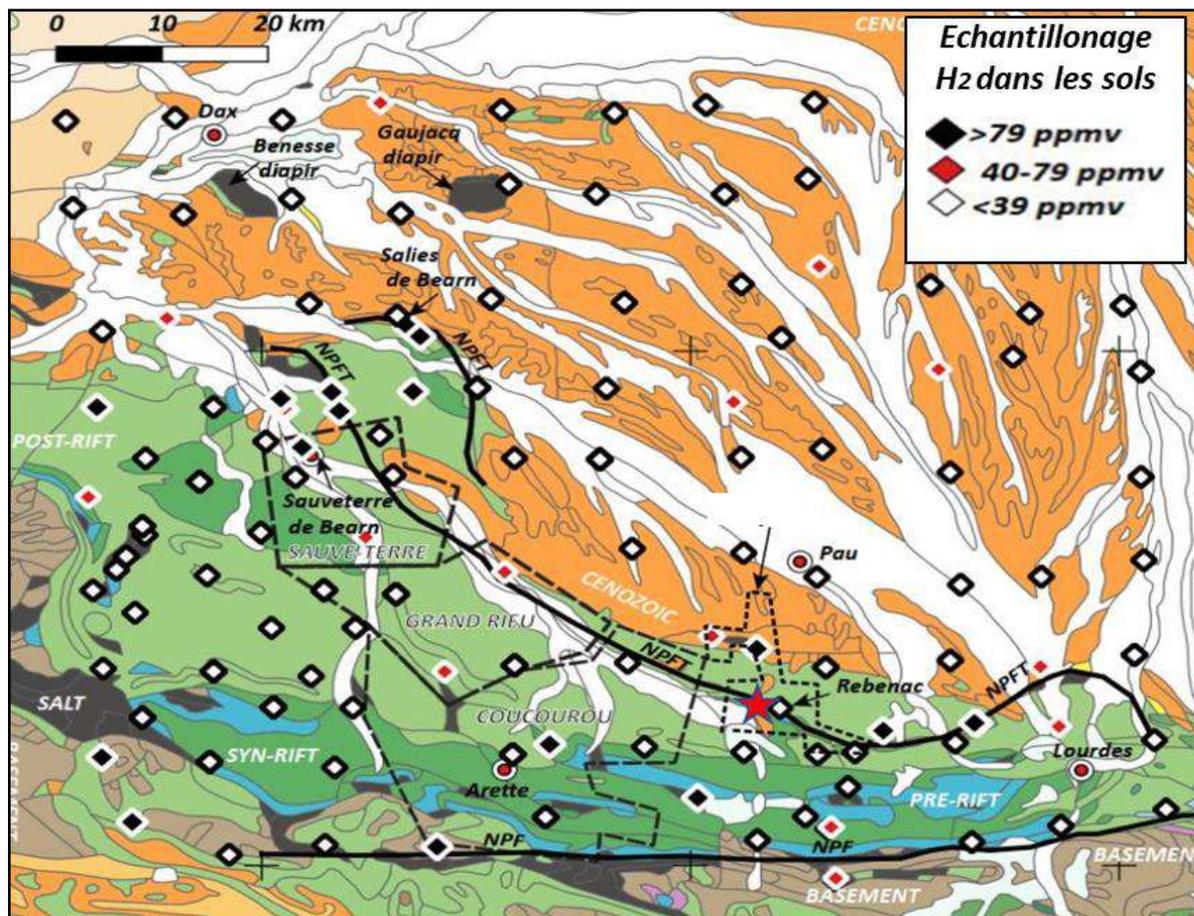
Qu'est-ce qu'un PER ? L'abréviation PER signifie **P**ermis **E**xclusif de **R**echerches. Appelé également permis d'exploration, celui-ci garantit l'exclusivité d'exploration à l'entreprise qui la détient sur la période définie. Il est possible de demander un PER pour une ou plusieurs ressources précises, dans le cas présent l'hydrogène, éventuellement l'hélium, sur un périmètre défini et une période limitée de 5 ans, mais renouvelable une fois. Le PER est délivré par l'Etat français et permet de veiller à ce que l'entreprise ait les compétences requises, s'acquitte de ses engagements et respecte l'environnement dans lequel elle opère.

Ce titre minier permet d'explorer le sous-sol. Après découverte d'un gisement, d'hydrogène et/ou d'hélium, qui en tant que substances du sous-sol appartiennent à l'Etat, pourront être extraites et commercialisées au titre d'une concession pour une durée généralement comprise entre 20 et 30 ans, selon l'échéance prévisible de l'épuisement du gisement, la durée initiale ne pouvant excéder 50 ans. Depuis le 13 avril 2022, l'hydrogène natif a été rajouté dans la liste des substances relevant du régime légal des Mines (Article L111-1 du Code Minier).

C'est en 2023 que la première demande du PER pour l'hydrogène (Sauve Terre H2) a été déposée dans les Pyrénées Atlantiques ; puis en 2023 et 2024, 4 autres PER ont été demandés (Deux dans le Béarn, un dans les Landes et un dans le Comminges) et actuellement début 2025, en sont à des étapes différentes de la procédure d'attribution. Le 29 mars 2025, les PER de Grand Rieu et de Marenzin dans les Landes, ont été octroyés à 45-8 Energy, par le ministère de la Transition Ecologique avec publication au Journal Officiel.



Carte (valable en février 2025) de localisation des 3 PER pour l'hydrogène (et Hélium) dans les Pyrénées Atlantiques. Extrait du site internet Camino, le cadastre minier numérique de la République française.



Les 3 PER béarnais (Sauve Terre, Grand Rieu et Couroucou) replacés dans leur contexte géologique régional et la grille d'échantillonnage H₂ dans les sols. Abréviations : NPF = Faille Nord Pyrénéenne, NPFT = Front de Chevauchement Nord Pyrénéen. D'après N Lefeuvre, thèse, Grenoble, 2022; Aubourg et al. (en préparation), extrait du livret guide excursion EAGE, M Blaizot et Ch. Aubourg, 2025.

Le secteur des hydrocarbures est habitué à utiliser des méthodes performantes, mais onéreuses. Il faut noter que les compagnies qui prennent actuellement des permis sont pour la plupart de petites compagnies et qu'elles n'ont pas une force de frappe suffisante, ni en personnel ni en fonds propres, pour commencer massivement les acquisitions une fois les permis octroyés. Elles ne peuvent donc pas se permettre de réaliser, par exemple, une acquisition sismique 3D très coûteuse. Les compagnies de géophysique tentent de s'adapter en proposant des outils à faible coût permettant de mettre en œuvre des techniques de sismique passive et de petites acquisitions

Le soutien financier des banques telles la BPI est crucial pour les petites compagnies. La labélisation au niveau de la Commission européenne de l'hydrogène naturel comme hydrogène décarboné est évidemment essentielle pour accéder à des subventions potentielles et pour faciliter la commercialisation en cas de découverte. La plupart des investisseurs ne sont pas habitués à gérer le risque « sous-sol », qui consiste en fait en une gestion de l'incertitude, dans les projets. Il serait donc bénéfique que l'État accompagne les premiers développeurs.

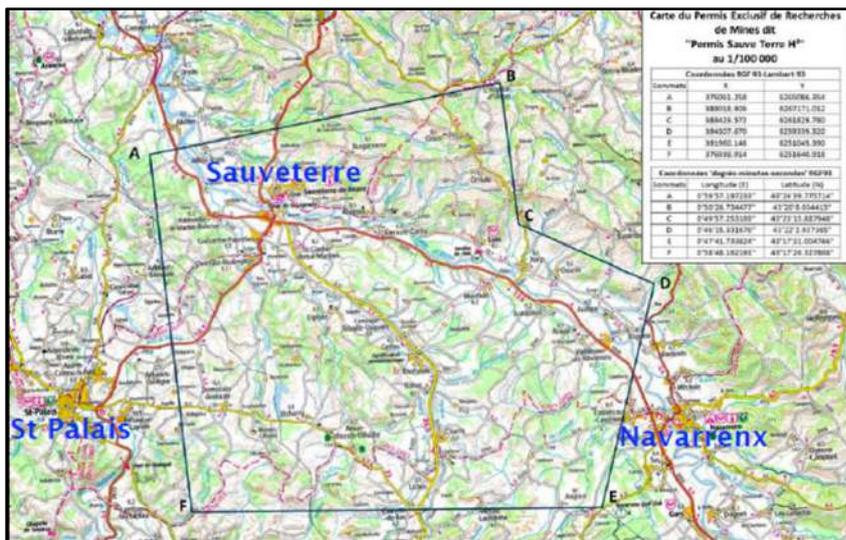
8-1 Le PER « Sauve Terre H2 »

Le premier Permis Exclusif de Recherche pour l'hydrogène dans les Pyrénées et aussi le premier en France, a été obtenu le 3 décembre 2023 par la société TBH2 Aquitaine qui est une filiale de Terrensis, une société pionnière dans ce domaine.

Caractéristique de ce PER :

Nom du PER : Sauve Terre H2. Nom donné à partir du village de Sauveterre de Béarn, la commune la plus importante de ce PER. Notez que Sauveterre, nom du village est écrit en un seul mot, alors que le nom de PER est écrit en 2 mots. Clin d'œil pour indiquer que l'hydrogène va Sauver la Terre ? H2 et non pas H_2 pour le symbole chimique de l'hydrogène, mais pour indiquer que l'Hydrogène, mais aussi l'Hélium est recherché sur ce PER. $H + H_e = H2$

La superficie de ce PER est de 225 km², sa durée de validité est de 5 ans, c'est-à-dire jusqu'à fin 2028.



Localisation du PER Sauve Terre H2. Doc extraite du site de TBH2 Aquitaine

Programme des travaux d'exploration

- Magnétométrie « terrestre » à vélo

Généralement les levés de magnétométrie s'effectuent par hélicoptère. L'originalité dans ce PER, c'est que le lever de magnétométrie a été effectué en vélo (soyons écolo surtout en exploration H₂ !). 800 km selon 18 profils EW et NS.



Le géophysicien-cycliste est chargé d'y mesurer le champ magnétique. Il est impossible de le faire en voiture à cause du métal de la carcasse qui parasiterait les mesures. Le vélo a un cadre carbone pour ne pas perturber les

mesures. Ensuite, on s'équipe d'une tige d'à peu près 2,50 m de long. En haut de cette tige se situent le capteur et une antenne GPS. Toutes les deux secondes, on enregistre une valeur du champ magnétique
Doc extraite du site de TBH2 Aquitaine et du journal local, la République des Pyrénées.

- **Sismique passive et sismique réflexion sur l'ensemble du PER**

Du 3 Septembre au 4 novembre 2024 : campagne d'acquisition de sismique passive (400 capteurs à 3 composantes) et « augmentée » par une campagne de sismique réflexion pour rajouter à l'enregistrement de la sismicité générée naturellement en profondeur (sismique dite passive, les mini-séismes étant la source des ondes sismiques) une composante de sismique réflexion depuis la surface (un camion vibreur envoie des ondes sismiques dans le sous sol), ce qui constitue en quelque sorte une sismique passive « augmentée », une innovation TBH2 Aquitaine et une 1^{ère} mondiale.



Camion vibreur de la société GTGI en action pour une acquisition de sismique réflexion. Le camion, par l'intermédiaire d'une plaque vibrante (en orange entre les roues) envoie des ondes sismiques dans le sous-sol, qui seront réfléchies par les différentes couches géologiques et enregistrées en surface par des capteurs/géophones. Le traitement de ces données sismiques et leur interprétation ont pour but de fournir une image des structures du sous-sol, en particulier pour la recherche des pièges. Doc extraite du site de TBH2 Aquitaine et du journal local, la République des Pyrénées.

- **Traitement et interprétation des données sismiques en cours**

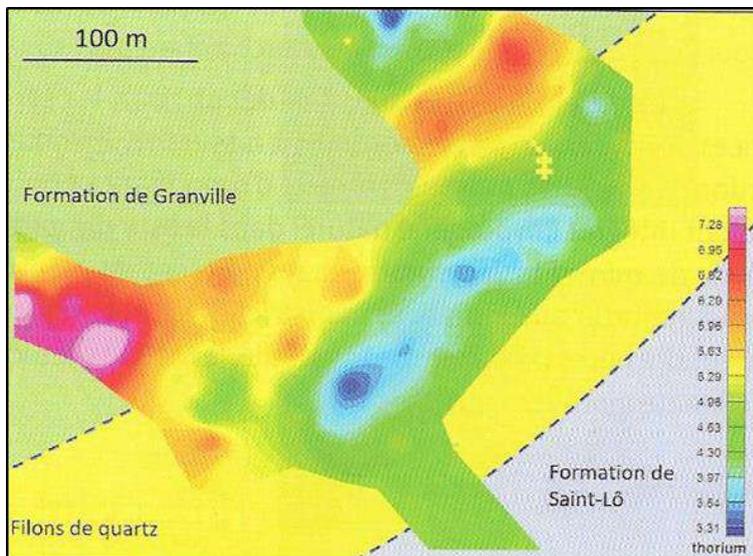
Après traitement et interprétations des images, on obtient ainsi le positionnement et la profondeur des potentiels pièges géologiques, la localisation des chemins de migration potentiel de l'H₂, ce qui permettra ensuite de prendre une décision pour forer un puits d'exploration. Seul le forage permettra de définir débits et volumes en fonction des caractéristiques (porosité, perméabilité, dimensions, ...) du gisement où l'hydrogène et l'hélium se sont temporairement accumulés

- en 2025, une nouvelle campagne sismique est prévue, cette fois-ci plus ciblée sur la zone la plus prometteuse définie par la campagne de 2024, et uniquement réflexion 2D ou 3D. Elle nécessitera la remobilisation d'un ou plusieurs camions vibreurs.
- 14 février 2025 : Fin de la première campagne de spectrométrie gamma, faite à pieds avec spectromètre portable.



Campagne de spectrométrie gamma, à pied. Spectromètre portable sur le dos qui enregistre la radioactivité (rayons gamma) le long de profils suivant une maille plus ou moins régulière. Doc extraite du site de TBH2 Aquitaine et du journal local, la République des Pyrénées.

On peut s'étonner que la radioactivité locale soit étudiée pour la recherche des émanations d' H_2 , mais curieusement des anomalies radiométriques ont parfois été observées à l'aplomb de failles émettrices d' H_2 , c'est donc une méthode de prospection indirecte pour l' H_2 en recherchant des failles émettrices d' H_2 . Il serait intéressant de tester la méthode utilisée pour l'exploration de l'uranium sous recouvrement, qui consiste à placer de petites coupes, à l'envers, dans un trou dans le sol, pendant plusieurs semaines. Un film fixé au fond de la coupe et sensible au rayonnement alpha, indique s'il y a des émissions de gaz Radon, sous produit de minéraux radioactifs.



Exemple de radioactivité anormale (anomalies Thorium ?) associée à des émanations d'hydrogène (> 1000 ppm) le long de la faille de Granville, avec filon de quartz, dans le Cotentin (travaux en cours en 2022). D'après Prinzhofer et al, 2023.

Rendez-vous dans 3 ans pour savoir si les recherches ont été fructueuses et qu'un forage d'exploration est alors proposé pour tester toutes ces hypothèses et interprétations

7-2 Le PER Grand Rieu

Ce PER couvre 266 km² sur 31 communes. Il est situé plus au sud que le PER de Sauve Terre H2 et s'étend jusqu'à Mauléon et Oloron Sainte Marie.

45-8 Energy, via sa filiale 45-8 Grand Rieu, est l'opérateur de ce PER en association avec Storengie, une filiale d'Engie.

Calendrier :

- mars 2023 : dépôt de la demande de PER
- septembre 2023 : Mise en concurrence de la demande
- avril 2024 : consultation publique
- 29 mars 2025 : octroi du PER pour une durée de 5 ans
- 2025-2029 : synthèse géologique et géophysique des données anciennes disponibles et acquisition de nouvelles données, pour définir un éventuel emplacement de forage d'exploration. L'opérateur a eu accès aux anciennes données sismiques et rapports d'interprétation d'elf et maintenant TotalEnergies.

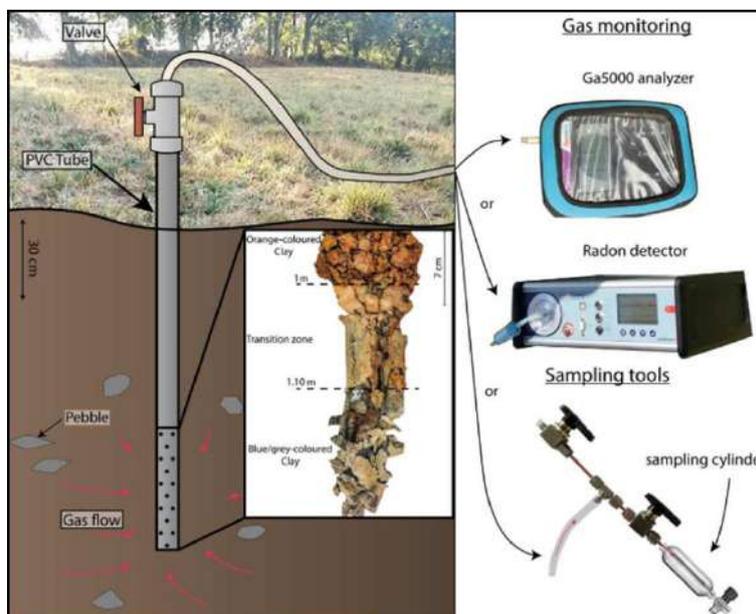
Objectifs du PER :

Préciser la localisation des roches propices à générer de l'H₂ (roches sources) et comprendre les chemins de migration de celui-ci vers la surface mais surtout vers des structures géologique (pièges avec réservoirs et couvertures) où il pourrait s'accumuler.

En cas de succès (pas avant 2030 ou 2032, après un ou des forages positifs), une estimation de production de 8 000 à 40 000 tonnes d'H₂ par an est avancée. Le volume susceptible d'être produit conditionnera la taille de l'unité de production et des pipelines vers le site industriel de Lacq, déjà grand consommateur d'hydrogène, qui pourra alors absorber la totalité de cette production.

Programme technique :

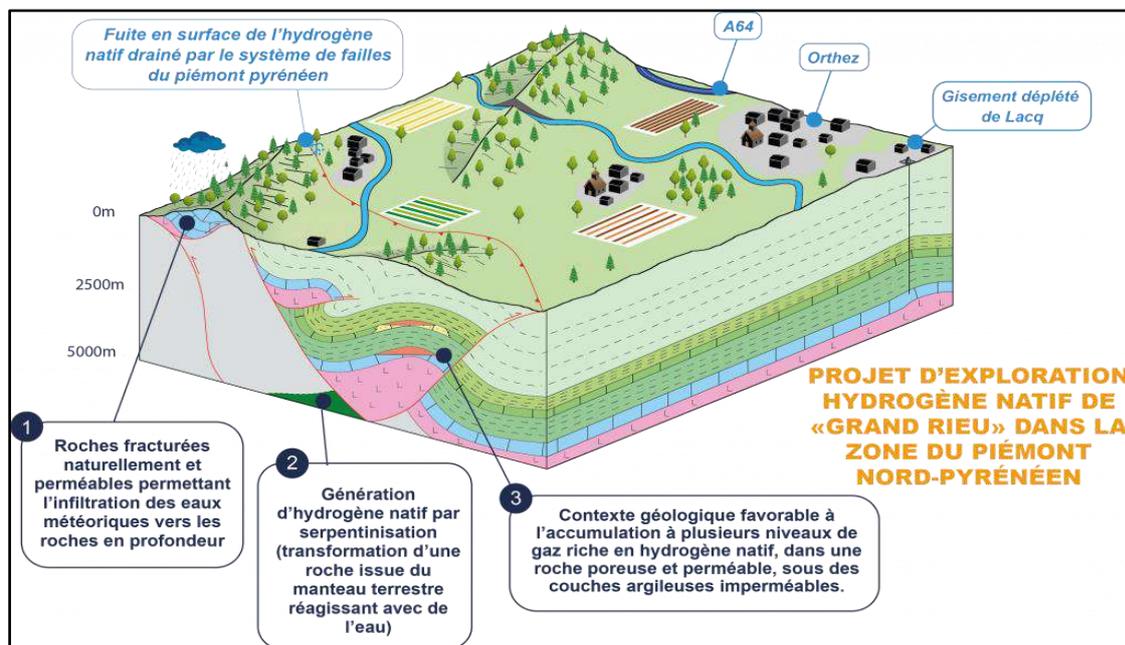
Les prélèvements des gaz et en particulier l'hydrogène dans les sols sont une technique relativement peu coûteuse (mais à manier avec précautions), mais très utile pour détecter des anomalies qui prouveraient qu'un système hydrogène fonctionne dans le secteur.



Exemple de sonde GA-5000, pour analyses des gaz dans le sol développé par Storengie. Diagramme schématisé, montrant l'accumulation de gaz dans un mini-puits de 1.20 m de profondeur, et sa connexion avec un analyseur de gaz et d'un enregistreur de radon.

Retraitement des données géologiques et géophysiques.

L'opérateur a eu accès aux anciennes données sismiques et rapports d'interprétation d'elf et maintenant TotalEnergies. Dans un premier temps retraiter les données géologiques et géophysiques existantes (puits, sismique « vintage » des années 60 à 90) vont être effectuées. Ces données devraient permettre de localiser les structures géologiques et serviront de point de départ pour définir les données complémentaires à acquérir. Afin d'enrichir les données existantes, des acquisitions géophysiques viendront compléter le programme de travaux. Pour aller plus loin dans l'analyse des structures et des roches réservoirs et couvertures, des études seront faites sur les échantillons de roches prélevées dans les puits d'exploration pétrolière.



Bloc diagramme 3D, résumant les caractéristiques et les enjeux du PER Grand Rieu.

- 1- les roches fracturées et perméables (par exemple les carbonates avec karstification) permettent l'infiltration des eaux météoriques vers la profondeur du bassin, ce qui est nécessaire pour activer la serpentinisation des péridotites/lherzolites.
- 2- génération d' H_2 par serpentinisation des péridotites/lherzolites présentes sous le bassin de Mauléon.
- 3- des structures tectoniques sont favorables au piégeage de l' H_2 à plusieurs niveaux stratigraphiques sous des couvertures argileuses imperméables : anticlinal faillé, ou sous chevauchements entraînant du sel (« over-hang » sous le sel triasique). D'après le site de 45-8 energy.

Rendez-vous donc dans 2 ou 3 ans, pour savoir si les recherches ont été fructueuses et qu'un forage d'exploration est alors proposé pour tester toutes ces hypothèses et interprétations, ou si le PER sera abandonné.

7-3 Le PER Couroucou (Haut Béarn-vallée d'Aspe)

C'est le 3^{ème} PER demandé en 2024 dans le piémont Pyrénéen. L'opérateur est TBH2 Aquitaine déjà opérateur du PER de Sauve Terre H2. Ce PER est plus vaste que les deux autres, et couvre 522 Km². Il est situé en prolongement vers le SE des deux autres PER (cf. carte page 82). Il correspond au même environnement géologique, c'est-à-dire la Zone Nord Pyrénéenne, mais en dehors du bassin de Mauléon et plus focalisé sur les chaînons béarnais, qui présentent plus de risques et d'incertitudes que le bassin de Mauléon (profondeur du manteau a priori plus importante, absence pour le moment de preuves d'émanations d' H_2 en surface, complexité tectonique, formations salifères probablement discontinues, car déformées et impliquées dans les plis et chevauchements, reliefs escarpés peu propices à des acquisitions sismiques classiques, etc)

A ce stade TBH2, n'a rien publié sur site internet concernant leurs objectifs et programme de travaux d'exploration.

7-4 Le PER de Marensin (mais dans les Landes)

On s'éloigne des Pyrénées avec ce PER de Marensin, puisqu'il est situé sur la côte atlantique dans les Landes. Mais ce PER comporte des similitudes, mais aussi des différences majeures, avec les autres PER du piémont pyrénéen et mérite donc qu'on s'y intéresse.

Des travaux de recherches bibliographiques et des études de terrain préliminaires ont été menées en 2021 et 2022. Ces recherches, réalisées dans le cadre d'un projet de recherche nommé H2NA (NA pour Nouvelle Aquitaine), auquel 45-8 Energy participait, ont révélé un potentiel en hydrogène natif dans cette région de Nouvelle Aquitaine. Dans ce contexte, Storengy et 45-8 ENERGY ont déposé conjointement une demande Permis Exclusif de Recherches (PER) sur une zone de 691km² dans le département des Landes (40) pour une durée de 5 ans. Storengy est opérateur sur ce permis. Cette demande a pour objectif d'approfondir les connaissances géologiques de la zone et de confirmer le potentiel en hydrogène natif.



Localisation du PER de Marensin, sur la côte atlantique dans les Landes.

Calendrier

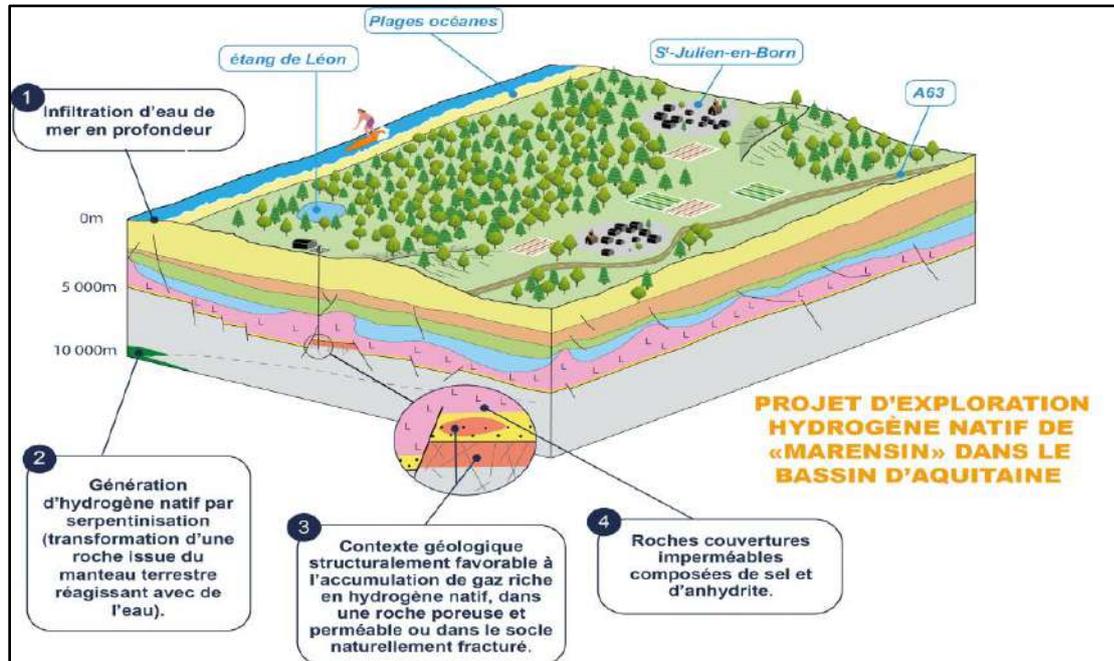
- mars 2023 : dépôt demande de PER
- décembre 2023 : mise en concurrence de la demande de PER
- avril 2024 : consultation publique
- 29 mars 2025 : octroi du PER pour une durée de 5 ans
- 2025-2029 : synthèse géologique et géophysique et acquisition de nouvelles données complémentaires.

Programme technique :

- récupération et retraitement des données géologiques et géophysiques existantes sur ce secteur, et acquises surtout par les pétroliers. Interprétation pour comprendre le chemin de migration de l'H₂ du sous sol vers la surface et rechercher les pièges potentiels.
- échantillonnage sols. Analyses en laboratoire de la composition de petits volumes de gaz prélevés dans les sols à l'aide d'une sonde enfoncée à 1 m de profondeur.
- acquisition de nouvelles données géophysiques, pour compléter les données existantes, d'autres techniques géophysiques légères pourraient être envisagées.
- gravimétrie. Utilisation d'un gravimètre (petit appareil portable) permet de mesurer les variations mineures du champ gravitationnel et de mieux imaginer les structures et la composition des roches en profondeur

- aéromagnétisme. En étudiant la réponse du sous-sol au passage d'une émission en surface d'une onde électromagnétique la méthode permet d'estimer, de façon non invasive, la résistance électrique du sous-sol.

Le bloc diagramme 3D, ci-dessous, permet de visualiser les caractéristiques de ce PER, qui comporte des similitudes mais aussi des différences notoires avec les PER béarnais.



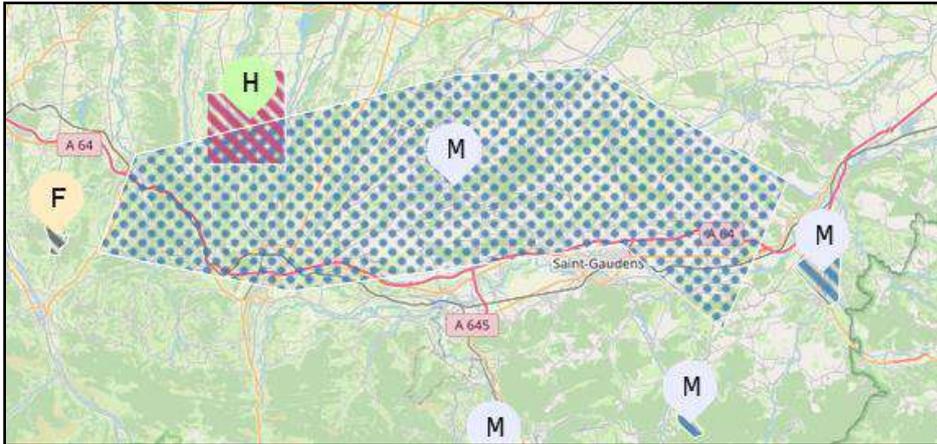
Bloc diagramme 3D, illustrant le système hydrogène du PER de Marensin. D'après le site de 45-8 Energy.

Quelques remarques personnelles de Géol Pyr :

- ce PER est localisé dans un contexte géologique bien particulier (= « seuil des landes » séparant bassin d'Aquitaine au sud, du bassin de Parentis, au nord).
- les eaux nécessaires à la serpentinisation du manteau proviendraient d'infiltration d'eau marine par des failles profondes au niveau de la côte atlantique. Données supportant ce concept ? La bordure est, terrestre, du bassin de Parentis quelques dizaines de km plus au nord serait peut être plus favorable ?
- présence de manteau à une profondeur adéquate ? Données disponibles ? (gravi, mag. etc)
- le sel triasique (prouvé par les forages pétroliers et la sismique) est présent et constitue la formation couverture à priori efficace.
- les pièges seraient localisés sous ces évaporites dans les formations réservoirs anté-salifères gréseux du Trias inf. et/ou dans le socle paléozoïque fracturé (Grès du Dévonien) . Plusieurs forages pétroliers dans les années 1960 à 1980, ont exploré cet objectif sous le sel pour les hydrocarbures, mais sans succès. A priori pas de piège envisagé pour l'H₂ dans les formations post-salifères ?
- L'ancien puits pétrolier de Contis lors de tests aurait produit de l'eau à partir d'un réservoir d'âge dévonien avec du gaz dissous dont 12 % d'H₂. Les indices d'H₂ dans ce puits ont certainement été un argument déterminant pour la demande de ce PER
- Par rapport au PER du piémont pyrénéen, ce PER Marensin, comporte beaucoup plus d'incertitudes géologiques et est bien moins « calibré » que les PER du piémont pyrénéen, mais le puits de Contis avec des indices d'H₂ est un argument crucial.

7-5 PER de Mantle8 /G&OL, bassin des Baronnies /Comminges

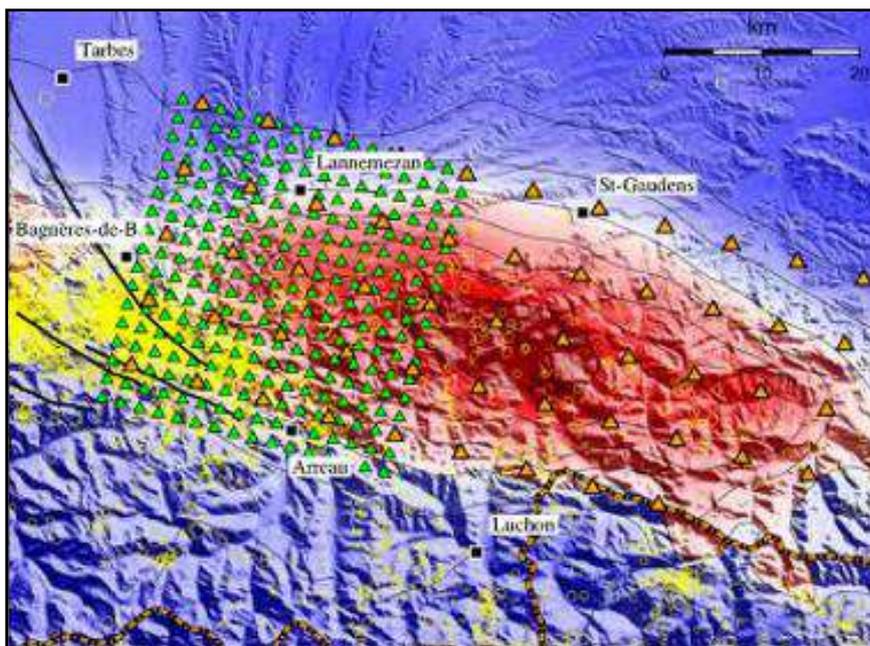
Ce PER a été demandé par les sociétés basées en Isère, Mantle8 et G&OL (si on prononce, clin d'œil à Géol ?) détenues par Emmanuel Masini, ancien géologue de TotalEnergies. Ce PER couvre une zone allongée en EW juste au nord de St Gaudens. 3.4 M€ de capitaux ont été levés, dont une partie provenant de la fondation Bill Gates.



Localisation du PER Hydrogène demandé par Mantle8 et G&OL situé au nord de Saint Gaudens. Extrait du site internet Camino, le cadastre minier numérique de la République français.

Pour l'instant peu d'information sur les travaux d'exploration en cours sur ce PER.

Cependant des études de sismique passive ont déjà été entreprises sur ce bassin du Comminges. Afin de mieux comprendre les relations entre sismicité et l'anomalie gravimétrique, le projet PICSO (Projet d'Imagerie Sismologique du Comminges) a été entrepris. Il consiste en deux déploiements simultanés de stations sismologiques. Le premier très dense (270 stations espacées de 2 km) se concentre sur la partie occidentale de l'anomalie gravimétrique de St Gaudens. Il permettra d'imager avec précision les zones sismiques actives (lié à la serpentinisation) et les zones muettes (pas de serpentinisation ?). Le second couvrira l'ensemble de l'anomalie (53 stations espacées de 7 km. Son but est de réaliser une image plus globale, avec une résolution plus faible.



Carte préliminaire des déploiements PICSO. Cercles jaunes = séismes de 1989 à 2019. Triangle vert = nappes à 2 km. Triangle orange = nappe à 7 km. Projet PICSO avril 2024

L'expérience permettra de localiser les événements sismiques avec une grande précision et obtenir une image très fine de la croûte supérieure par des techniques d'échographie sismique. Seront alors rassemblés les renseignements fondamentaux sur la nature de ces séismes, leur origine, et le lien éventuel entre la sismicité naturelle et l'anomalie du champ de gravité. Cette phase PICSO s'est déroulée de mai à Juillet 2024. Les résultats ont confirmé la faisabilité de l'expérience PICSO.

Les cibles hydrogène recherchées se focalisent sur la zone dite des Petites Pyrénées, sous le sel du Trias sup. L'hydrogène généré dans un lambeau allochtone du manteau (mis en évidence par les études de Pisco) en cours de serpentinitisation migrerait, via des chevauchements enracinés en profondeur, en avant de la ZNP de la chaîne des Pyrénées, c'est-à-dire dans les Petites Pyrénées et viendrait se piéger en fond de bassin du Comminges sous le sel du Trias. Mais les objectifs potentiels sont à grande profondeur ce qui entraînera des coûts élevés de forage.

Pour plus d'information géologique consulter le paragraphe page 78.

8 - Conclusions

Les explorateurs géologues ont tendance à raisonner par analogie avec ce qu'ils connaissent déjà et à utiliser des modèles et concepts bien renseignés, pour leur raisonnement et interprétation. Pour un ancien géologue pétrolier, il est normal de faire appel au système pétrolier bien connu et outil robuste qui a largement fait ses preuves en exploration pétrolière, pour essayer de définir ce qu'est ce nouveau le système hydrogène natif ; il conviendrait plutôt de dire, **les** systèmes hydrogène natif, compte tenu par exemple des diverses roches sources, correspondant à des environnements géologiques très diversifiées à travers le monde.

En se référant au système pétrolier, nous avons donc défini les éléments et processus du système hydrogène à appliquer et à utiliser dans un contexte d'avant pays d'un orogène, comme le piémont pyrénéen.

Il apparaît que le bassin de Mauléon, dans la Zone Nord Pyrénéenne, avec son extension possible, mais bien plus risquée, vers le sud-est vers les chaînons béarnais (zone en partie couverte par trois PER) combine plusieurs critères favorables pour une génération d'hydrogène natif :

- manteau à une **profondeur adéquate (8 à 10 km) pour être sujet à une serpentinitisation, génératrice d'hydrogène,**
- par **l'infiltration d'eaux météoriques par des failles de chevauchement s'enracinant très en profondeur** (même si ce concept reste hasardeux), héritées de l'ancien rift albien surtout sur la bordure méridionale de ce rift et réactivées lors de la phase pyrénéenne. Ces infiltrations d'eaux météoriques sont indispensables pour entretenir le processus de serpentinitisation du manteau générant de l'hydrogène. La micro-sismicité actuelle indiquerait que ces failles sont toujours actives.
- les modélisations montreraient que la serpentinitisation est déjà bien avancée actuellement, **mais un grand volume d'hydrogène pourrait encore être généré, dans une fenêtre de températures adéquates.**
- présence de réservoirs, couvertures et pièges similaires à ceux de l'exploration réalisée par les pétroliers dans ce secteur ; mais il faut se rappeler que cette exploration s'est soldée par un échec, car le système pétrolier local n'as pas fonctionné correctement avec des prévisions qu'on peut anticiper similaires pour un système hydrogène ? **Ces thèmes d'exploration sont donc très risqués et donc non prioritaires.**
- mais aussi des nouveautés favorables pour l'hydrogène en particulier des **réservoirs et pièges anté-sel triasiques sous une épaisse couverture étanche d'évaporites, qui sont les plus prometteurs et les moins risqués,** mais qui présentent **l'inconvénient de se situer souvent à grande profondeur** (parfois > 7000 m ?) Il faudra sélectionner les zones où les pièges anté-salifères pourraient exister à des profondeurs moindres, pour être testées par forage à des coûts raisonnables. Des incertitudes subsistent quant à la qualité des réservoirs gréseux du Trias inf.

- quelques coûts de référence pour des forages profonds, sachant que les deux derniers puits profonds forés dans ce secteur ont été terminés en 1993. Pour information le forage de Bellevue-1D qui a atteint 6 909 m de profondeur (record en France) et a duré 3 ans, après beaucoup de problèmes techniques. Il a coûté 207 millions de francs de l'époque (1993) ce qui correspondrait à **52 Millions d'€ de nos jours**. De même le forage de Meillon Nord -1D terminé lui aussi en 1993 à 4 946 m de profondeur a coûté 82 Millions de francs de l'époque, ce qui équivaldrait à **20 Millions d'€ de nos jours**. Il faut prendre conscience qu'un **forage profond à 5 000 m de profondeur se chiffrera en plusieurs dizaines de millions d'€**.
- malgré les progrès de la sismique (acquisition et traitement), la **base du sel reste difficile à imager correctement en sismique**, car les couches d'évaporites se comportent comme un écran à la pénétration des ondes sismiques.
- cependant, ce type **d'objectif anté-salifère est le plus prometteur et le moins risqué en exploration hydrogène**.
- des **émanations d'hydrogène en surface** (campagnes de mesures des gaz dans les sols ou recherche de ronds de sorcières pour études détaillées?), via des chevauchements s'enracinant en profondeur (Front de Chevauchement Nord Pyrénéen et ses chevauchements associés), de la bordure septentrionale de la Zone Nord Pyrénéenne, **prouveraient qu'un système hydrogène natif fonctionne localement**.
- **mais sans toutefois, de garantie que des accumulations commerciales existent**.

Le bassin du Comminges /Baronnies couvert en grande partie par le PER de Mantle8, présente des similitudes avec le bassin de Mauléon :

- anomalie gravimétrique positive indiquant la **présence d'un corps mantellique à des profondeurs adéquates pour la serpentinisation et la génération d'hydrogène**.
- **des failles de chevauchement s'enracinant en profondeur et pouvant servir de chemins de migration pour l'hydrogène vers des pièges sous le sel ... ou vers la surface**.
- pas encore de résultats publiés des études des gaz dans les sols pour détecter des émanations d'hydrogène en surface. Mais présence de ronds de sorcières ? Mais où ?
- dans ce bassin le système pétrolier a bien fonctionné, **mais pas d'hydrogène (sauf une exception à valider ?) mentionné dans ces pièges pétroliers, d'où le peu d'intérêt de rechercher ce type de pièges pour l'hydrogène**.
- Les objectifs les plus prometteurs et les moins risqués consistent à trouver **des pièges pour l'hydrogène sous les évaporites de Trias, mais avec le problème récurant des difficultés à identifier ces pièges en sismique et la profondeur de ces objectifs avec des coûts importants pour les forages**.

Seul un ou des forages d'exploration, à condition d'obtenir le financement, permettront de vérifier toutes ces interprétations. Rendez-vous dans 2 ou 3 ans pour sabler le champagne ?

JM et LSP, Géol Pyr –Mai 2025

www.facebook.com/geodetours

pour retrouver tous les modules de Géol Pyr : <https://bit.ly/geolpyr>

pour contacter Géol Pyr : contactgeolpyr@gmail.com

Remerciements.

A Géol Pyr nous prenons un soin particulier à publier des modules, scientifiquement corrects avec des données récentes et actualisées, même si c'est de la vulgarisation scientifique ou de la « médiation scientifique » comme on dit maintenant. Compte-tenu du caractère innovant du sujet abordé nous avons sollicité, avec plus ou moins de succès, plusieurs relecteurs et correcteurs avec des profils variés connaissant ce sujet de l'hydrogène natif.

Nous remercions chaleureusement nos anciens collègues Jean-Jacques Biteau (qui vient de nous quitter) et Jean-Marie Flament d'Elf et TotalEnergies, pour leurs corrections, leurs apports de connaissances personnelles et de données très intéressantes, parfois inédites. Nous remercions également Benoit Hauville, aussi un ancien de TotalEnergies, actuellement directeur général de 45-8 Energy (une des sociétés détentrices du PER de Grand Rrieu) pour ses échanges fructueux.

Pour aller plus loin :

Les « indispensables » :

- **L'hydrogène naturel : curiosité géologique ou source d'énergie majeure dans le futur ?**
Isabelle Moretti, Août 2022 <https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/lhydrogene-naturel-curiosite-geologique-ou-source-denergie-majeure-dans-le-futur>

- **Début de l'exploration-production d'hydrogène naturel : une nouvelle ère pour l'hydrogène ?** Isabelle Moretti UPPA Pau, <https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/debut-de-lexploration-production-dhydrogene-naturel-une-nouvelle-ere-pour-lhydrogene>

- **Nouvelles méthodes d'exploration des ressources en hydrogène naturel (H2) : Le cas d'école du piémont Pyrénéen occidental.** Nicolas Lefeuvre, Thèse de Géologie appliquée. Université Grenoble Alpes, 2022. Télécharger le pdf de la thèse à partir de ce site
- <https://theses.hal.science/tel-03770203>

- **Présentation de Philippe Dubreuilh, géologue, à La CPIE littoral basque le 23 avril 2023.** Publication bien documentée, découverte par hasard, après la rédaction de ce module de Géol Pyr, rassurant en temps qu'auto contrôle du contenu du module de Géol Pyr.
- <https://cpie-littoral-basque.eu/lib/pdf/460528.pdf>

- **Description géologique du gisement de Bourkebougou au Mali**
- <https://www.nature.com/articles/s41598-023-38977-y#citeas>

- **Native H 2 exploration in the western Pyrenean foothills.**
Lefeuvre, N., Truche, L., Donzé, F.-V., Ducoux, M., Barré, G., Fakoury, R.-A., et al. (2021). Native H 2 exploration in the western Pyrenean foothills. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009917. <https://doi.org/10.1029/2021GC009917>
- <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021GC009917>

- **Livret guide de l'excursion EAGE, 1et 2 juin 2025** Exploring natural hydrogen in the Pyrenean piedmont: from source rocks to reservoirs (Charles Aubourg, Marc Blaizot ,Sabine Delahaye, Gille Fabre, Emmanuelle Baudia, Nicolas Gonthier) .
https://drive.google.com/file/d/112UTrK7lz0RoMXThKCzVdZSrSci1f6Au/view?usp=drive_link

- **Les processus de serpentinisation et de production d'hydrogène dans la Zone Nord Pyrénéenne occidentale ; du terrain à la caractérisation expérimentale** .Thèse de Camille Tichadou, Montpellier, Juillet 2021,
- <https://theses.fr/2021MONTG029>

- **Natural hydrogen emanations in Namibia. Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis.** Isabelle Moretti et al, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 84, October 2022, pages 35588-35607
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922036631>

Les deux principales publications de Joseph Canérot pour une meilleure compréhension géologique du bassin de Mauléon :

- The pull apart-type Tardets-Mauléon Basin, a key to understand the formation of the Pyrenees. J Canérot , *Bull. Soc. géol. Fr., BSGF - Earth Sciences Bulletin* 2017, 188, 35 <https://www.bsgf.fr/articles/bsgf/pdf/2017/05/bsgf170005.pdf>
- The Mid-Albian unconformity, a key to understand the geodynamics of the North Pyrenean Trough. Joseph Canérot and Francis Médiavilla, *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 2023, 194, 4 <https://www.bsgf.fr/articles/bsgf/pdf/2023/01/bsgf210047.pdf>

Autres publications intéressantes :

- A mineral system approach to targeting nature hydrogen deposits , *Geotech* 2023 <https://getech.com/blog/hydrogen/a-mineral-systems-approach-to-targeting-natural-hydrogen-deposits/>
- Hydrogène naturel : ce qu'on sait déjà en fin d'année 2024 <https://www.lookupgeoscience.com/fr/hydrogene-naturel-ce-que-l-on-sait-en-2024/>

-L'hydrogène naturel / blanc / natif : une ressource reconnue et un potentiel pressenti parue le 16 juillet 2024 <https://www.connaissancedesenergies.org/lhydrogene-naturel-une-ressource-reconnue-et-un-potentiel-presentsenti-240716>

- Programme d'exploration de TBh2 aquitaine sur PER de Sauve Terre, avril 2024 <https://www.larepubliquedespyrenees.fr/societe/nouvelles-technologies/on-y-va-un-peu-avec-l-esprit-pionnier-les-operations-pour-trouver-de-l-hydrogene-natif-ont-debute-en-bearn-une-premiere-en-france-19182313.php>
-
- La France a une carte à jouer dans l'hydrogène naturel, H2Mobile, 30.03.2021 Philippe SCHWOERER <https://www.h2-mobile.fr/actus/france-carte-jouer-hydrogene-naturel/>
-
- L'hydrogène naturel ou « blanc » : nouveau pétrole vert ou chimère énergétique ? YouMatter, mai2023 <https://youmatter.world/fr/categorie-economie-business/hydrogene-naturel-blanc-solution-transition-energetique/>
-
- Une initiative européenne. Pour l'hydrogène du sous-sol. Earth2 by avenia <https://www.earth2-hydrogen.com/>
-
- Pour accéder à la base Minergies des anciens puits pétroliers <http://www.minergies.fr/fr/page/acces-aux-donnees>

Des vidéos intéressantes et sérieuses

- Vidéo , survol de la terre et localisation des ronds de sorcières / cercles de fées. Recopier ce lien dans votre navigateur internet. Et cliquer sur la vidéo en bas de la page <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2304032120#supplementary-materials>
-
- Vidéo. Ce camion qui sonde le sous-sol béarnais et soule, en quête d'hydrogène. Sud Ouest, 4 octobre2024 <https://www.sudouest.fr/pyrenees-atlantiques/sauveterre-de-bearn/bearn-des-gaves-le-camion-qui-sonde-le-sous-sol-bearnais-en-quete-d-hydrogene-21647430.php>
-
- Le Permis Exclusif de Recherche de Sauve Terre H₂ et son programme des travaux d'exploration en cours
-
- <https://www.sauve-terre-h2.fr/>
- Vidéo : Hydrogène naturel : un gisement record en Lorraine ?
-
- <https://www.youtube.com/watch?v=gh8HNcXZWcE>
- Vidéo : Hydrogène naturel découvert en France : la solution aux énergies fossiles ? • FRANCE 24
- <https://www.youtube.com/watch?v=4Nlz3IUuWAE>
-
- Vidéo : Hydrogène, la révolution verte ? | Documentaire CNRS <https://www.youtube.com/watch?v=wNJEL2hUQ5E>

