

GÉOL PYR
Redécouvrir la géologie des Pyrénées

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

(version résumée)

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

Avertissement :

Ce module est la version « courte », mais déjà consistante, d'une version beaucoup plus complète (une centaine de pages très illustrées) sur le sujet de l'hydrogène natif, qui s'invite de façon un peu inattendue dans les Pyrénées. Si vous souhaitez encore approfondir le sujet, nous vous conseillons bien sûr cette « version longue » -LIEN- : vous verrez, ça se lit (presque) comme une enquête policière ... celle d'un géologue qui découvre ce vaste domaine dans les Pyrénées.

1 - Introduction

Dans le cadre de la transition énergétique, on parle beaucoup d'hydrogène **vert**, c'est à dire de l'hydrogène fabriqué par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable, décarbonée et excédentaire. Cet hydrogène vert servira de plus en plus à décarboner des industries, transports et engins lourds, tous fortement émetteurs de gaz carbonique (CO₂), dont on connaît l'effet sur le climat global. Car, à l'heure actuelle, la majorité de la production mondiale est de l'hydrogène « **gris** » à partir du gaz naturel, dont la fabrication émet beaucoup de CO₂.

L'hydrogène vert est décarboné, mais couvre moins des 10 % de la production actuelle. Cette production est très coûteuse et requiert de grandes quantités d'électricité et d'eau. C'est pourquoi il est important de considérer des voies complémentaires pour produire de l'hydrogène décarboné de manière plus sobre, telle que l'exploitation de ressources en hydrogène naturel du sous-sol ou hydrogène natif (H₂, ou dihydrogène ¹) ou naturel, et qualifié « d'hydrogène **blanc** ». C'est celui qui nous intéresse ici.

Cet hydrogène naturel est généré de manière en partie renouvelable dans le sous-sol par divers processus géologiques, dont un des plus intéressants est via des réactions géochimiques entre différentes roches contenant du fer et de l'eau.

L'hydrogène étant le plus léger des gaz et la plus petite des molécules, il migre à travers les roches et le long des réseaux de fractures et de failles depuis les roches sources où il a été formé. A l'instar des hydrocarbures, lors de sa migration vers la surface, l'hydrogène peut s'accumuler dans des roches poreuses réservoirs, et y être piégé, à la condition que si ces roches réservoirs soient recouvertes par des roches couvertures imperméables. Il peut alors y avoir formation de gisements d'hydrogène natif. Actuellement, un seul gisement d'hydrogène natif est exploité à Bourakébougou, au nord de Bamako (Mali). Bien sûr, si l'hydrogène n'est pas piégé lors de sa migration, il peut atteindre la

¹ Pour simplifier, on utilisera le terme « hydrogène » dans ce texte, bien qu'il s'agisse, en toute rigueur, du « dihydrogène »

surface et s'échapper dans l'atmosphère. De nombreuses zones d'émanations d'hydrogène natif sont étudiées sur tous les continents. La recherche sur tout le cycle de l'hydrogène naturel est très importante dans de nombreux pays, dont la France, et l'exploration pour découvrir des ressources en hydrogène natif en est à son tout début. (d'après *Philippe Dubreuil, 2023*).

Dans le piémont pyrénéen, l'exploration de l'hydrogène natif vient de démarrer sur trois Permis Exclusifs de Recherche (PER) dans le Béarn, et un dans le Comminges. Mais 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.

2 - Comment la nature et les processus géologiques génèrent de l'hydrogène 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 dorsales 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.

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 des hydrocarbures (CH₄, C₂H₆, etc.), mais aussi directement sous forme gazeuse.

L'hydrogène naturel est encore 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.

A l'échelle du milieu continental, où l'exploration va a priori se focaliser, le schéma page suivante 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.

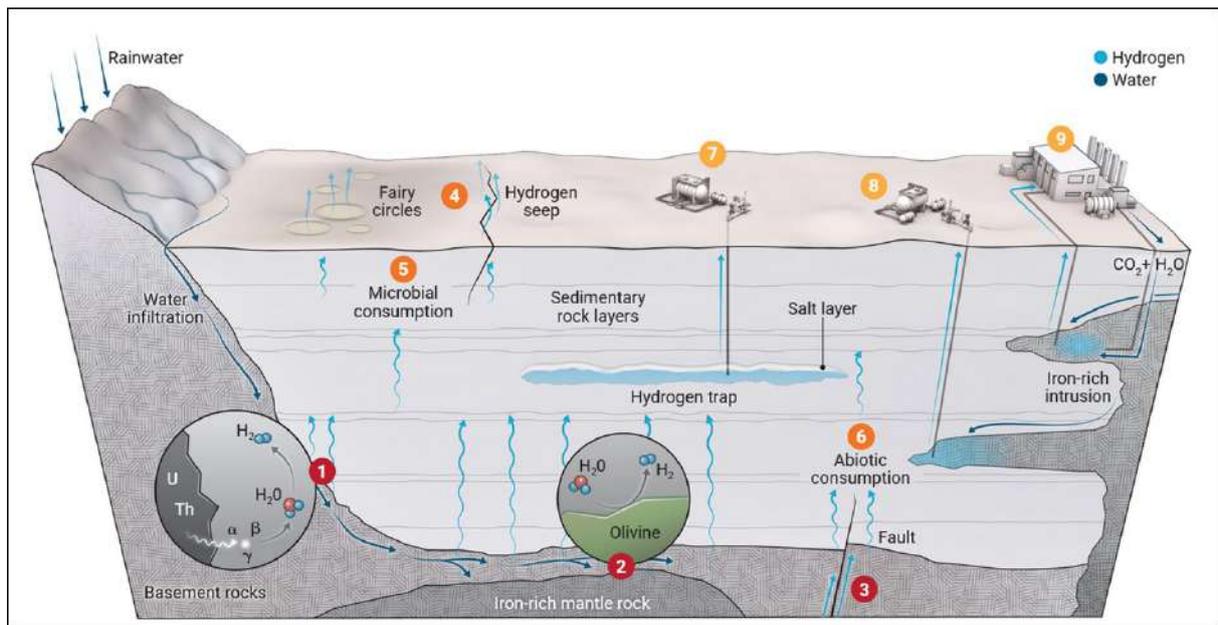


Schéma illustrant les différentes potentielles « usines à hydrogène » en milieu continental. D'après l'article « Hidden Hydrogen » paru dans www.science.org, le 16 février 2023, G. Ellis USGS.

Légende (en français) du schéma ci-dessus:

Génération d'hydrogène (3 processus) :

- 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 « Iherzolites » 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.
- 3- La serpentinisation et la radiolyse d'hydrogène sont les principaux processus géologiques pour 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.

ET : Émanation 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 dégagerait 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.

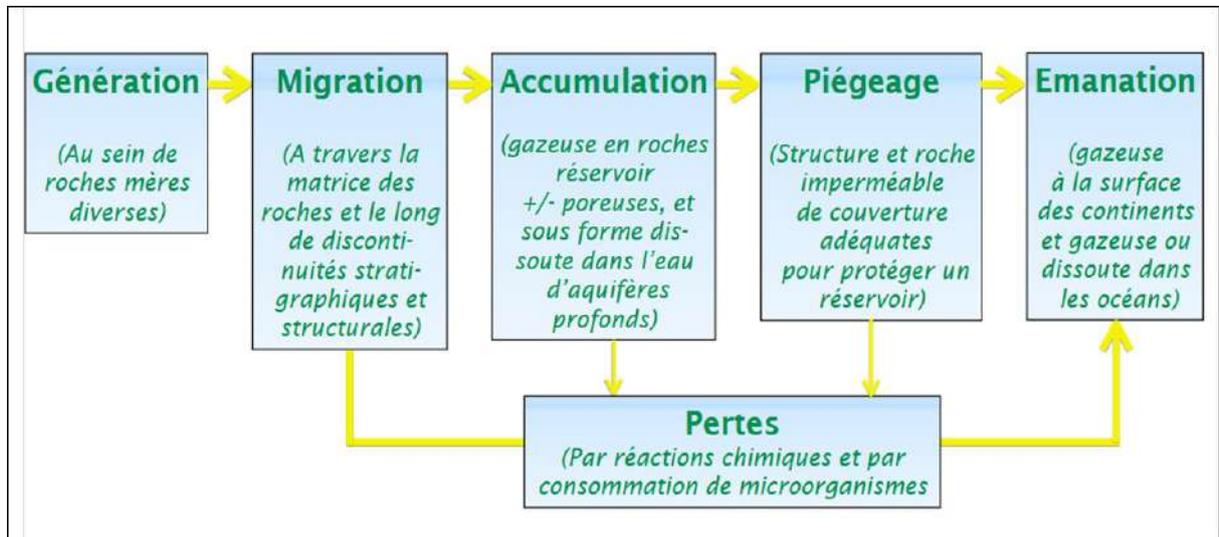
8- Extraction directe. Il pourrait être possible d'extraire directement l'hydrogène à partir de roches riches en fer, si ces dernières sont relativement peu profondes (= atteignables par forage) et suffisamment fracturées (avec l'aide de la fracturation hydraulique, très controversée ?) pour que l'hydrogène soit collecté (par exemple, cas d'hydrogène dans les couches de minerais 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 CO_2 pour le séquestrer en profondeur.

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

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

A quelques variantes près, on retrouve dans le « système hydrogène » tous les éléments et processus du système pétrolier utilisé depuis des décennies par les géologues d'exploration pétrolière, qui sont résumés dans le schéma ci-dessous :



Éléments 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 H₂), des modalités d'altération différentes entre l'hydrogène et une huile. Extrait de la présentation de Ph. Dubreuilh à la CPIE littoral basque, 2022.

Un fonctionnement original du système hydrogène : un flux actuel continu de l'hydrogène

Certaines accumulations d'hydrogène se rempliraient actuellement, et de ce fait peuvent 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 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).

3-1 la roche source pour l'H₂ dans les Pyrénées : les péridotites du manteau

Les géologues pyrénéens (et les lecteurs de Géol Pyr ...) savent qu'à la place de la chaîne actuelle des Pyrénées existait un rift à l'Albien (fin du Crétacé inf., ~ 110 Ma). Ce rift était constitué de plusieurs bassins en relais, où localement affleurerait au fond le manteau exhumé ; manteau constitué de péridotites, appelées lherzolites dans les Pyrénées (d'après l'étang de Lherz en Ariège). On a donc une roche source potentielle pour l'hydrogène, si ces péridotites sont sujettes à une serpentinisation par action de l'eau.

3-1-1 La serpentinisation : quelques rappels de chimie minérale

La serpentinisation est une réaction d'altération eau-roche, durant laquelle les roches ultra-mafiques (les péridotites constituées d'olivine et de pyroxène) sont oxydées par l'eau en serpentine et produisent de l'H₂ 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.

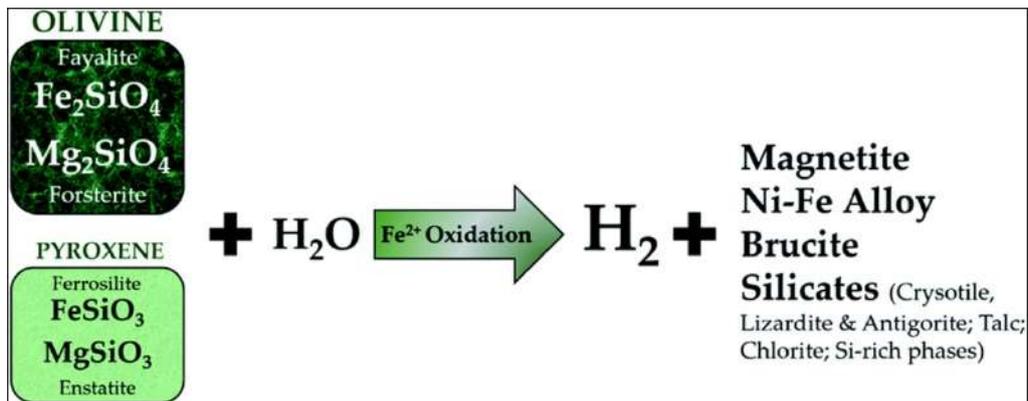


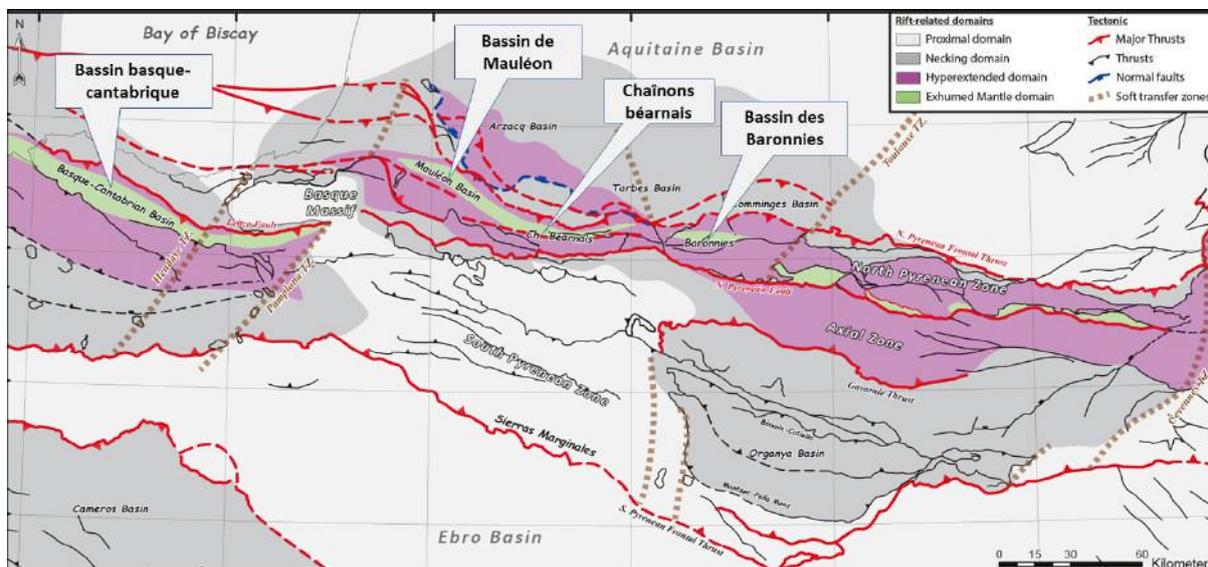
Schéma illustrant la réaction de **serpentinisation** de l'olivine et du pyroxène, produisant de l'hydrogène et divers silicates. D'après NG. Holmet al, Astrobiology, 2014.

Conditions de température

La présence de serpentine 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.

3-1-2 Les péridotites/lherzolites 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, c'est ce qu'on nomme « l'exhumation du manteau ». La carte suivante montre (en vert) les différents bassins où le manteau était exhumé en fond de rift. La question qu'on doit alors se poser : actuellement, alors que la phase de compression pyrénéenne est passée par là, à quelle profondeur le manteau se trouve-t-il pour être dans des conditions optimales pour générer de l'H₂?



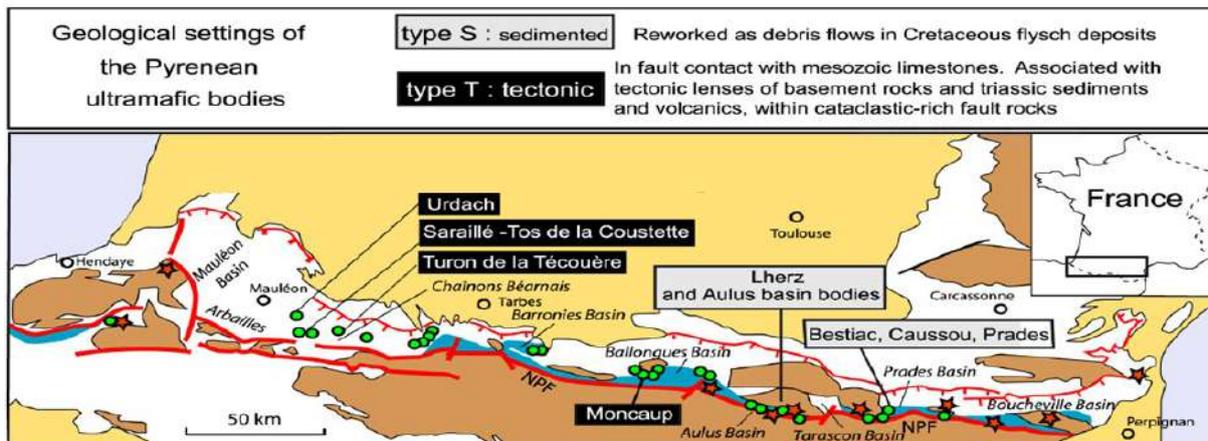
Carte des divers domaines associés au **rift albien**. Le manteau était alors exhumé localement en fond de rift dans le bassin basque-cantabrique, le bassin de Mauléon, les chaînons béarnais, le bassin des Baronnies et quelques autres petits bassins (en vert clair sur la carte) dans la Zone Nord Pyrénéenne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

3-1-3 Les péridotites/lherzolites du manteau à l'affleurement dans les Pyrénées

Le rift albien a été repris en compression lors de la phase orogénique pyrénéenne, tout a donc été déplacé, mais on peut encore actuellement identifier 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.

Des études sur les affleurements de lherzolites (Montaut, Turon de la Técoùère, 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 proviendraient pas de sources profondes : elles 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 Lagabriele et Bodinère 2008 et thèse Filleaudeau, 2011.

3-1- 4 Les zones à lherzolites à des profondeurs acceptables dans les Pyrénées ?

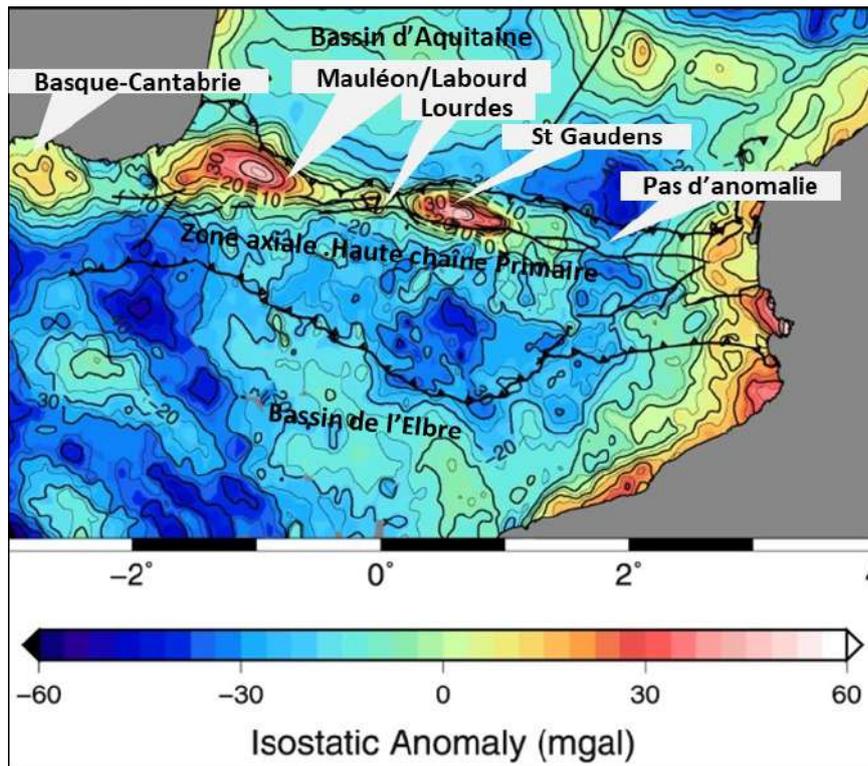
Le terrain de chasse pour l'hydrogène dans les Pyrénées se précise donc : c'est a priori la Zone Nord Pyrénéenne et son extension dans le bassin basque-cantabrique. Maintenant, il faudrait déterminer où le manteau se trouve encore actuellement à des profondeurs acceptables (par exemple à moins de 10 km, et non pas à 30 km + de profondeur habituelle). Cela pour diverses raisons : pour être a 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 (comme les péridotites), et d'évaluer leur profondeur.
- les **données magnétiques** sont complémentaires, l'association d'un corps dense et fortement magnétique laissant 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 actuelles de fluides en profondeur, soulignant ainsi une potentielle migration.

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



Carte gravimétrique isostatique des Pyrénées. Anomalies positives en jaune – rouge. 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 leur 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 transtension 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 associés avec l'orogénèse pyrénéenne. D'après Lacan (2008), modifiée d'après Bayer et al. (1996) et Casas et al. (1997)

Ces anomalies positives ont donc un certain intérêt :

- 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.
- Lourdes, de dimension plus restreinte. Profondeur du manteau ?
- 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 les anomalies de Mauléon et de St Gaudens, on trouve 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.

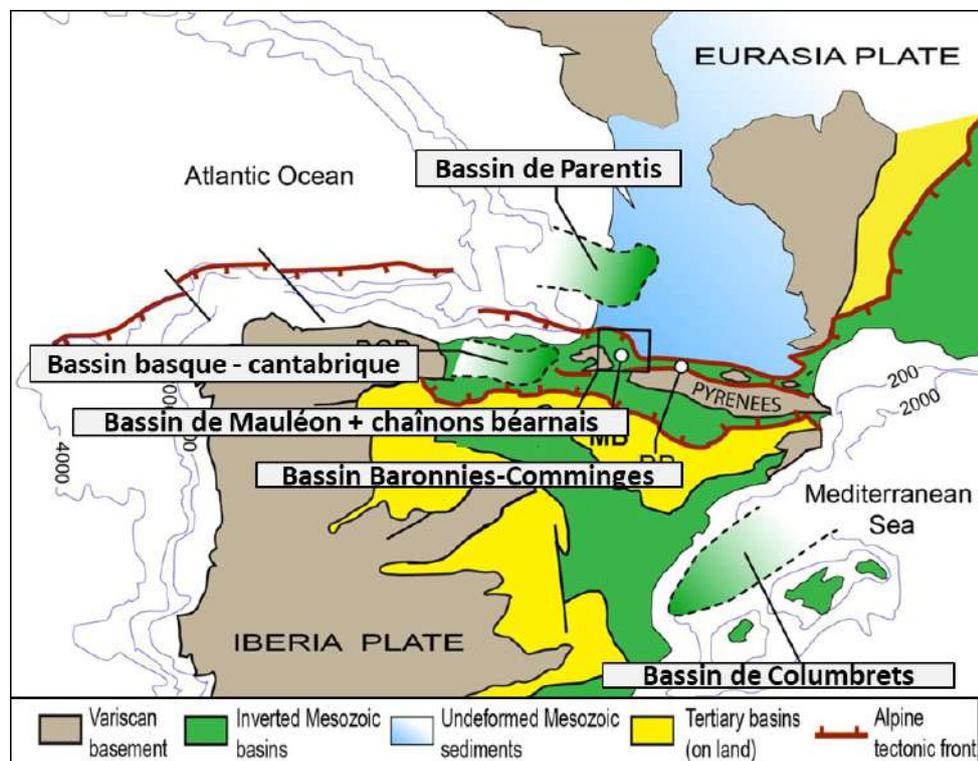
3-2 Le potentiel hydrogène du bassin de Mauléon

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 en priorité sur ce secteur, puisqu'un « système hydrogène » semble fonctionner dans cette zone, mais sans qu'on sache s'il existe des accumulations commerciales. C'est ce que devront vérifier les travaux d'exploration au cours des prochaines années.

Cette zone prioritaire ayant été sélectionnée, examinons donc son potentiel hydrogène, toujours en utilisant le concept du « système hydrogène ».

3-2-1 Cadre géologique du bassin de Mauléon.

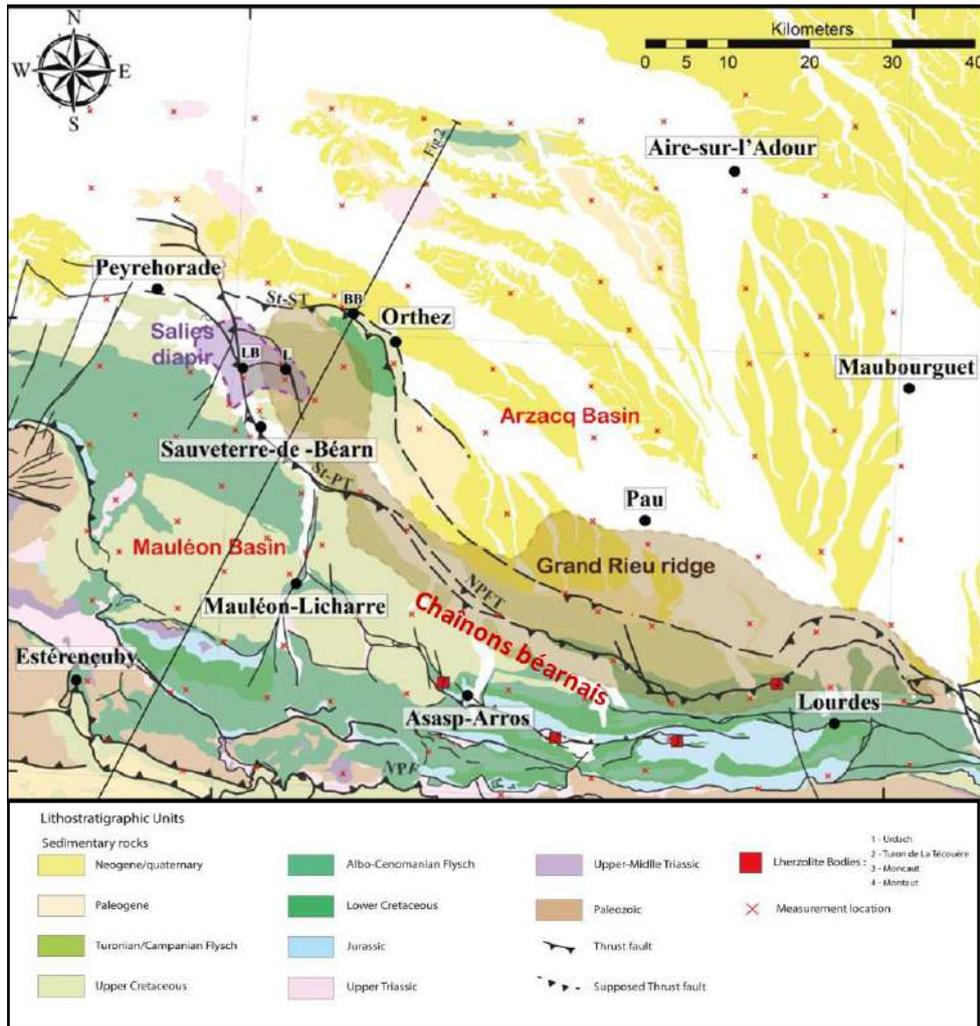
Le bassin de Mauléon est un des bassins avec remplissage de type rift à l'Albien, avec localement exhumation du manteau en fond de rift, appartenant à la chaîne Pyrénées-cantabrique, puis inversé et réactivé tectoniquement lors de la phase pyrénéenne.



Carte structurale simplifiée, avec les divers bassins albiens inversés (en vert) 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. Il s'agit en réalité d'un élément de ce rift au sein duquel le décrochement régional W-E senestre dominant 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 (fin de l'Albien) 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 donc unique, car il a conservé en grande partie ses anciennes structures transtensives datant du Crétacé, la compression pyrénéenne ayant été plus tardive et moins accusée que dans les Pyrénées orientales et centrales. Nous nous focaliserons sur les critères géologiques utiles pour la définition du système hydrogène dans ce bassin.



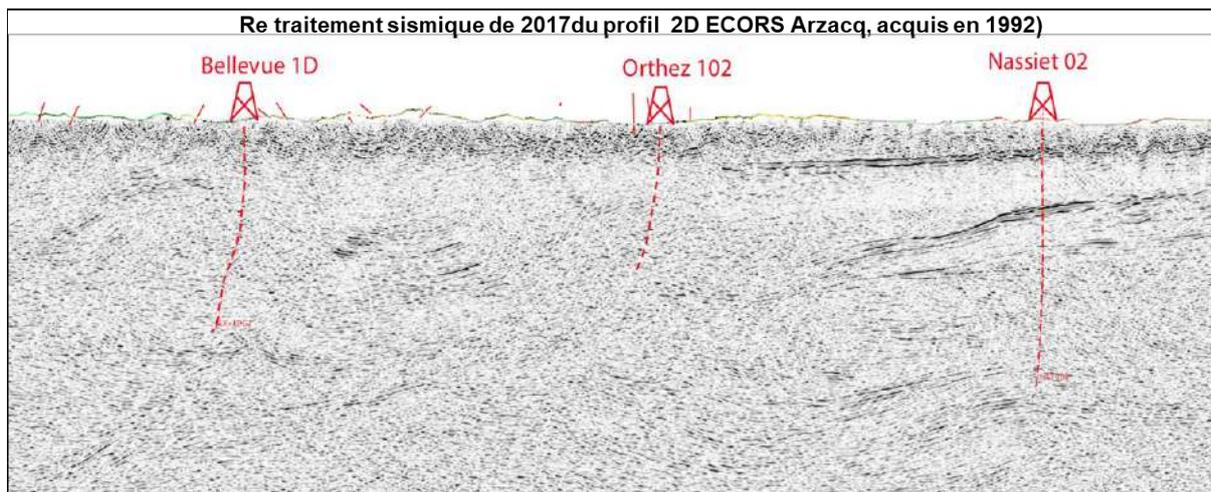
Carte géologique de la Zone Nord Pyrénéenne (avec le bassin de Mauléon et son extension vers les chaînons béarnais) et une partie du bassin d'Arzacq. Les points rouges correspondent à la grille des mesures d' H_2 dans les sols. D'après N. Lefevre, thèse Grenoble, 2022

3-2-2 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 aient pu avoir accès à ces données.

Sismique

Le bassin de Mauléon est couvert par une grille irrégulière de sismique 2D ancienne (années 60 à 80) et en partie par la sismique 3D couvrant le gisement de Lacq. 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 imager 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).

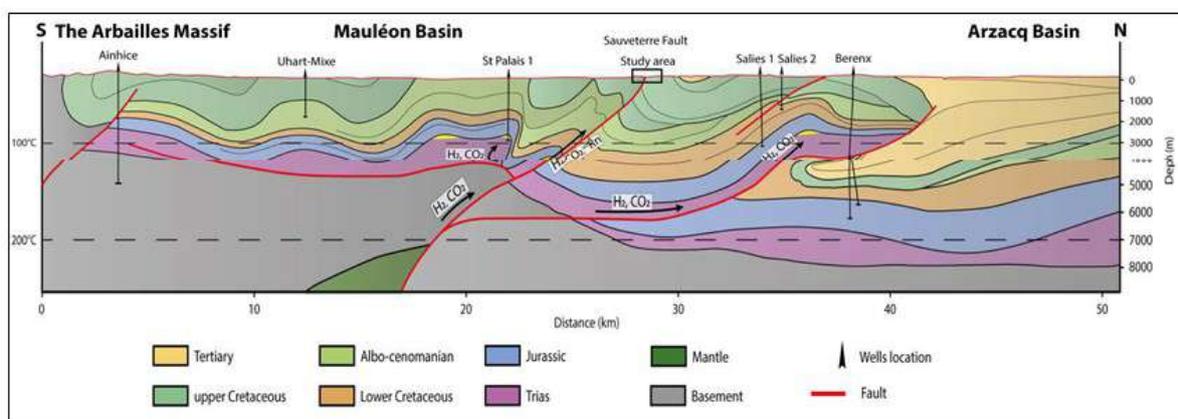


Exemple de section sismique, profil Ecors d'Arzacq, passant dans le bassin de Mauléon avec les trajectoires de 3 puits, dont Bellevue-1D. Section acquise en 1992 et retraitée en 2017. Malgré ce retraitement, la qualité sismique reste très médiocre. Si vous ne voyez pas grand-chose, ne vous inquiétez pas, vous n'êtes pas les seuls, 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.

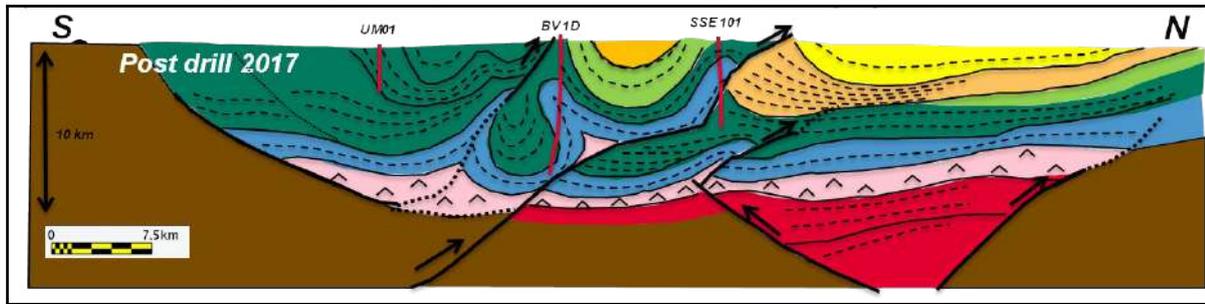
Données de forages

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. Les données puits sont accessibles au public, via la base Minergies.

Les coupes géologiques suivantes montrent la localisation des puits de la zone 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 (en mauve) 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

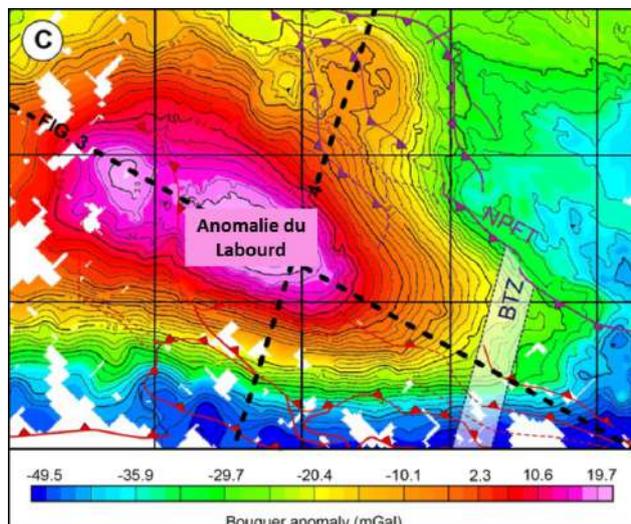


Coupes montrant l'interprétation de Bellevue-1D (BV1D en rouge) après retraitement sismique en 2017, en utilisant le profil sismique Ecors d'Arzacq. A noter l'implication du sel dans les chevauchements et la profondeur guère atteignable par forage, des éventuels pièges sous le sel pour l'hydrogène. D'après 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.*

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

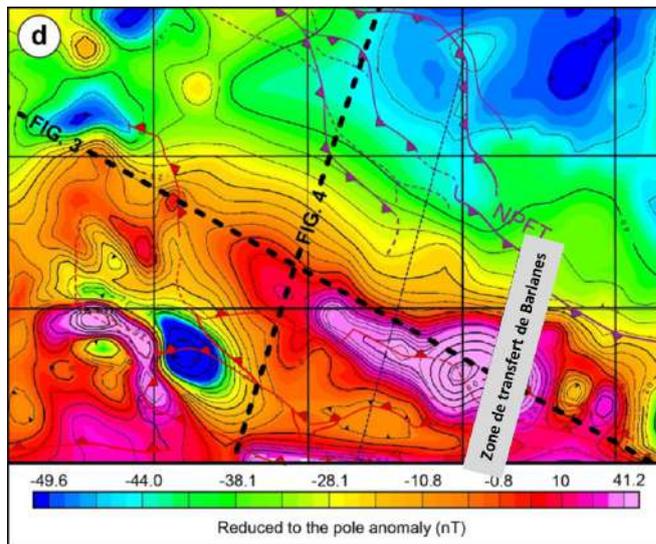
Plusieurs études des données issues des méthodes géophysiques, ont révélé des caractéristiques intéressantes sur la structure profonde de cette partie ouest des Pyrénées par traitement des données gravimétriques, magnétiques et sismiques. Des indices qui parlent :

1 : 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.



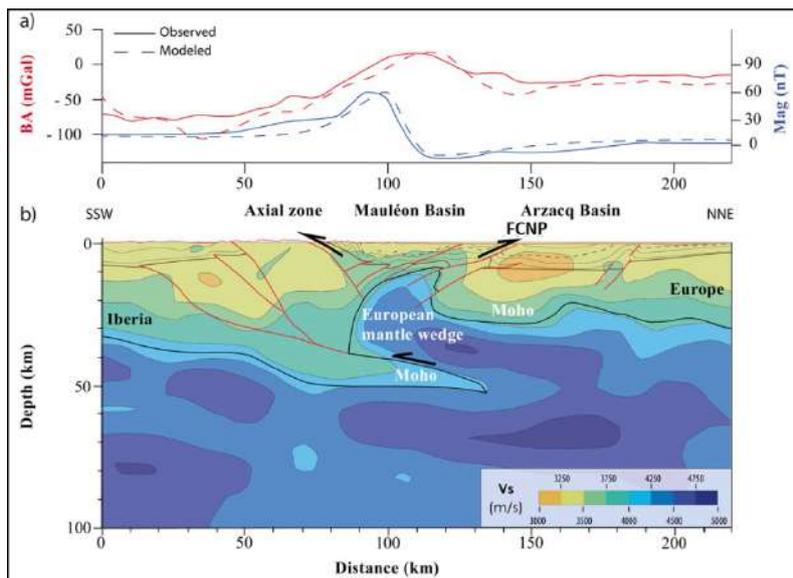
Anomalie de Bouguer, montrant une forte anomalie gravimétrique appelée classiquement anomalie du Labourd, et centrée sur le bassin de Mauléon. BTZ = Zone Transformante de Barlanès
D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution in a Hyperextended Rift Suture: Implication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

2 : 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.



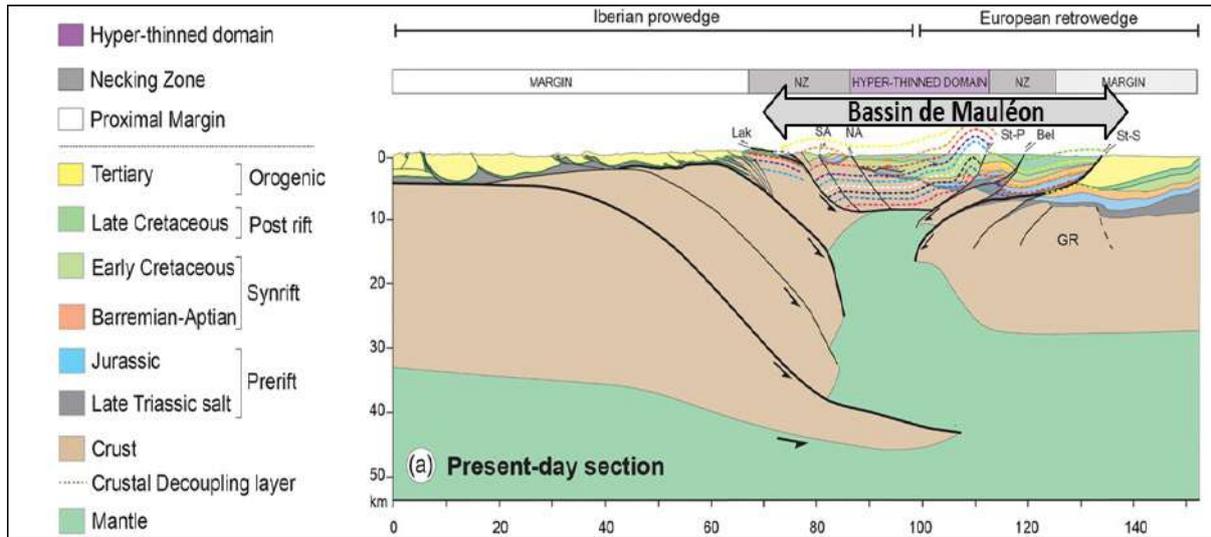
Anomalie magnétique positive réduite au pôle, centrée sur la zone de transfert tectonique de Barlanès dans le SE du bassin de Mauléon. Cette anomalie peut être en relation avec la magnétisation induite par le serpentinisation. D'après Nicolas Saspiturry et al, *Serpentinization and Magmatic Distribution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

3 : des vitesses sismiques élevées (V_p , vitesses des ondes de compression d'environ 7.3 km/s, contre une vitesse des ondes de cisaillement d'environ 4.2 km/s) ont été calculées à partir d'un processus d'inversion sismique, et sont attribuées à un corps de manteau serpentinisé, anciennement exhumé au fond de l'ancien rift albien, et localisé à des profondeurs de 8 à 10 km .



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

En résumé, on a un « faisceau de présomptions » vers la présence d'une roche source potentielle pour l'hydrogène par serpentinisation des roches du manteau, et vers l'existence de conduits préférentiels pour la migration des fluides. Le bassin de Mauléon peut donc être considéré comme un environnement prometteur pour l'exploration de l'hydrogène natif.



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

3-2-4 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 absent dans le système pétrolier.

Le contexte structural de piémont ou de l'avant pays d'un orogène est a 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 zones, par la présence de systèmes de failles profondes allant s'enraciner au cœur 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 permet plusieurs milliers de mètres de gradient vertical.

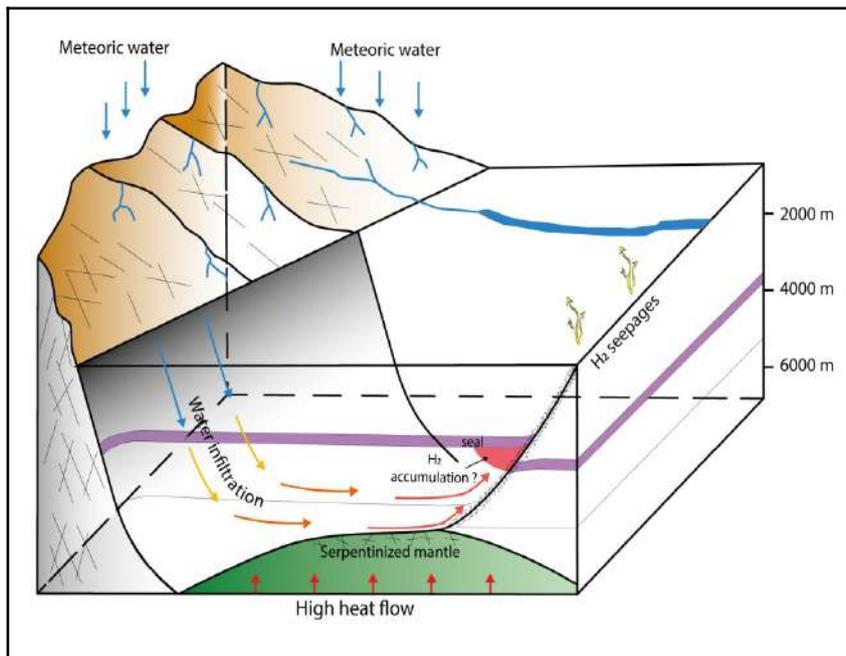
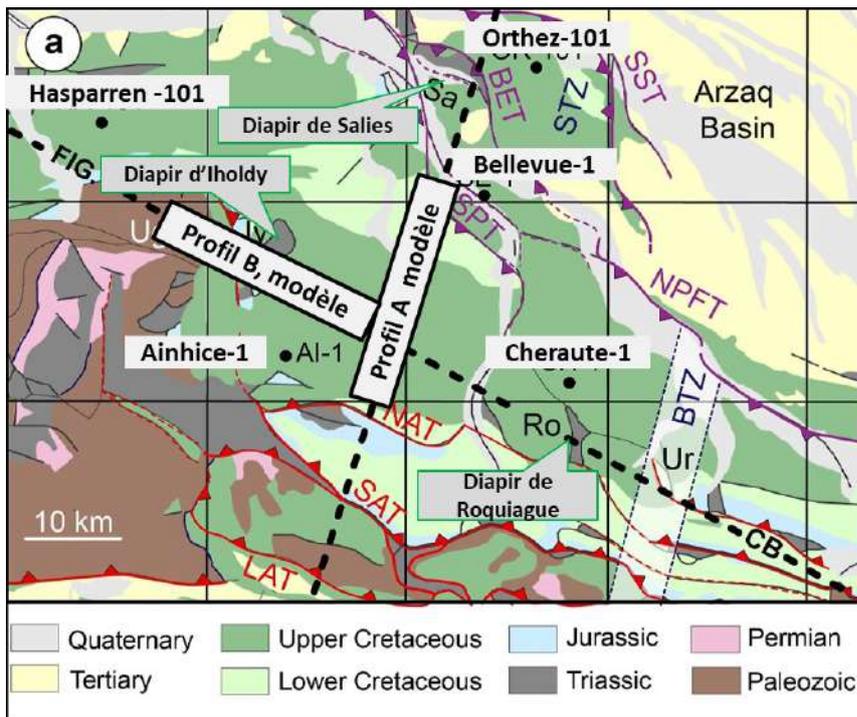


Schéma d'un système propice à la génération d'H₂ et son accumulation en contexte de piémont pyrénéen. L'eau météorique s'infiltrant se réchauffe via les fractures au cœur de l'orogène. Les boucles de convections hydrothermales vont être générées à l'approche des roches mantelliques et du flux de chaleur 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 H₂ » dans la région du Bassin de Mauléon à partir de la carte géologique ci-dessous.



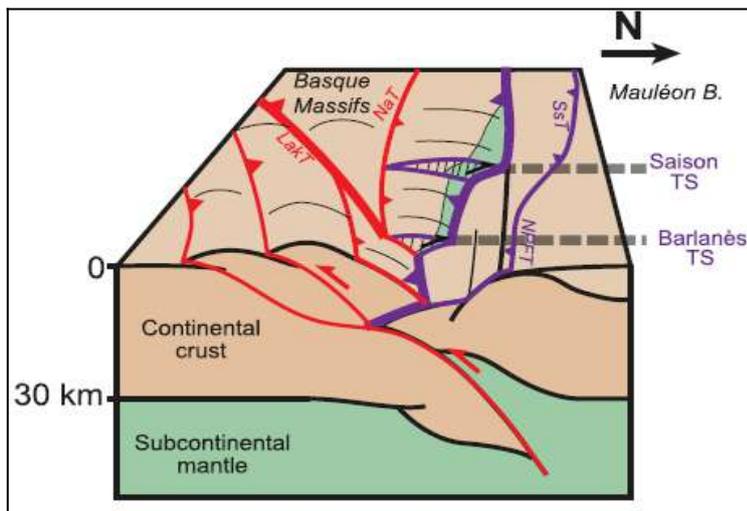
Carte géologique et structurale du bassin de Mauléon avec les divers chevauchements à vergence nord (en violet) et à vergence sud (en rouge). Localisation des anciens forages (Al-1 Ainhice-1, OR-102 Orthez-102, BE-1 Bellevue-1, HA-101 Hasparren-101, CH-1 Cheraute-1) et les deux profils qui ont servi à la modélisation géophysique. 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 le flysch du Crétacé supérieur, traversé par d'anciens diapirs de sel très déformés (ex. « diapirs » d'Iholdy et de Salies). Le bassin de Mauléon est séparé du bassin d'Arzacq (bassin prolifique en huile et gaz naturel) par la ride de Grand Rieu, qui n'affleure pas, mais est 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.

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

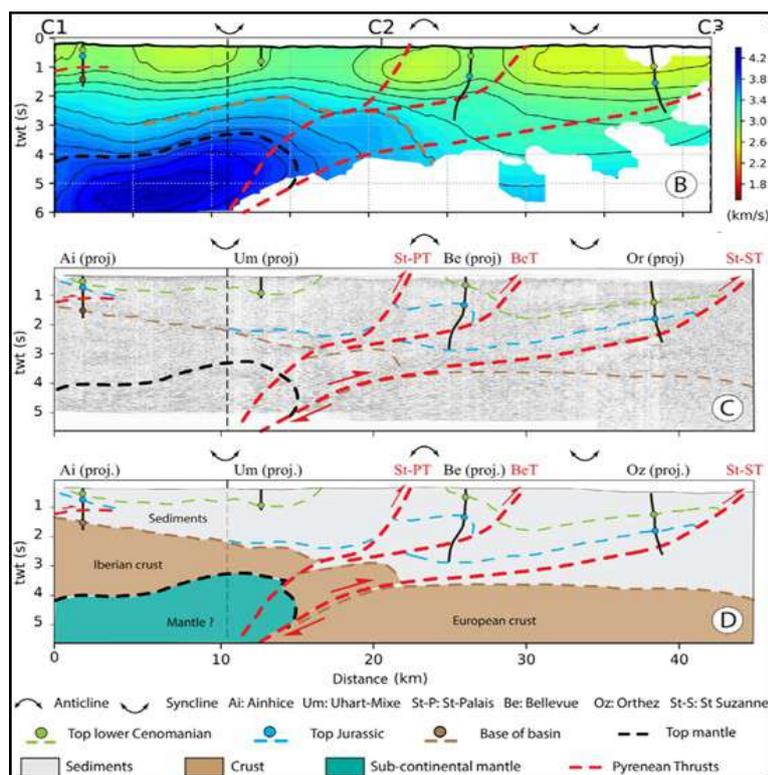
Pourquoi autant insister sur ces chevauchements ? C'est qu'ils vont jouer un rôle prépondérant pour l'infiltration des eaux météoriques nécessaires à la serpentinisation des lherzolites (surtout ceux sur la bordure sud), mais aussi pour la migration de l'H₂ vers la surface (surtout via les chevauchements de la bordure nord) ... tout en espérant qu'il soit piégé quelque part, avant d'arriver en surface.

Ce schéma structural actuel résulte de la compression pyrénéenne et correspond à une géométrie dite en « pop-up » ou en éventail, avec la double vergence des chevauchements entre nord et sud du bassin ; tous s'enracinent en profondeur dans une même zone, sous le bassin sédimentaire de Mauléon. Le tout est 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 Lefeuvre, 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 FCNP², 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 (de direction SW-NE dans la partie ouest du bassin de Mauléon).

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 péridodites du manteau.

Page BSGF - Earth Sciences Bulletin 2021, 192, 47, M. Lehujeur et al. Published by EDP Sciences 2021

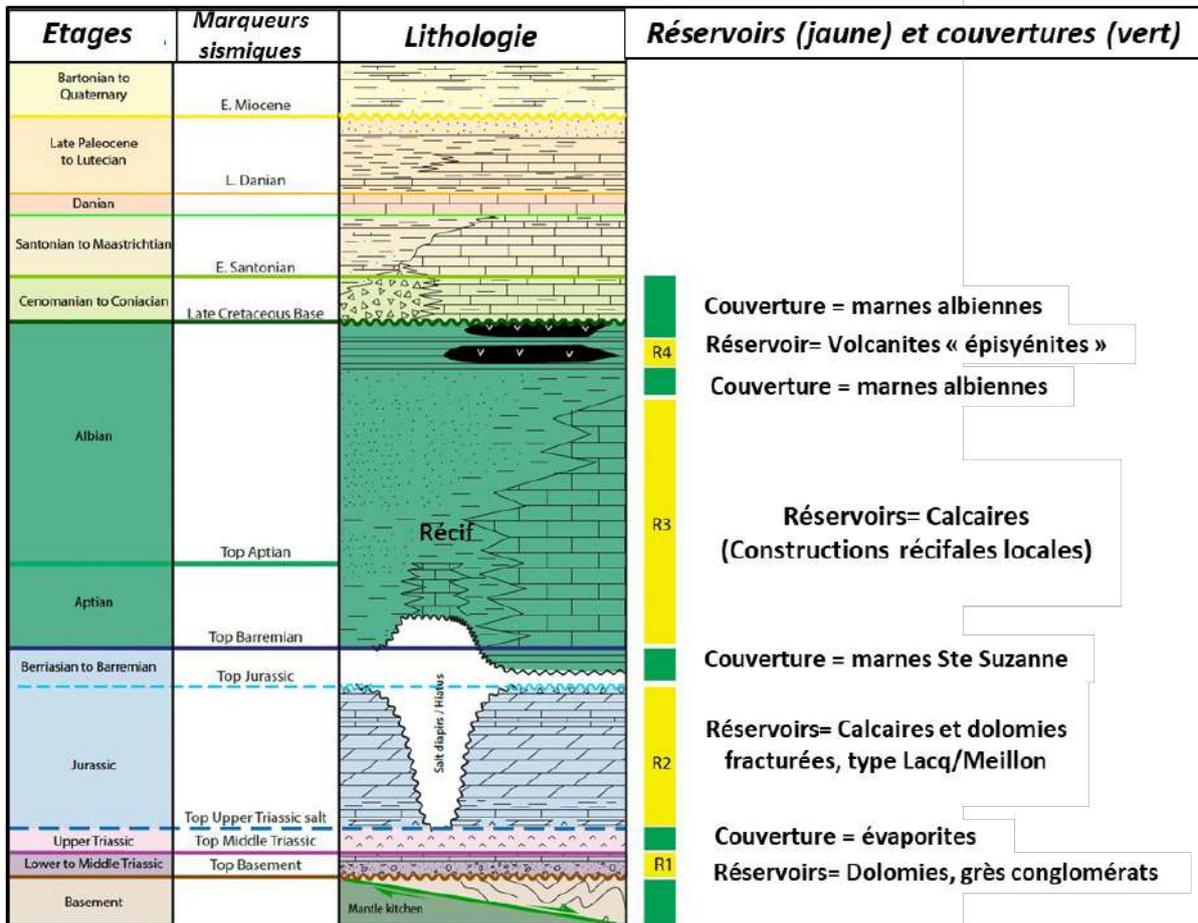
3-2-5 Les couples réservoirs /couvertures potentiels

Dans le système pétrolier, il est difficile d'évaluer séparément roches-réservoirs et roches -couvertures ; il en est de même pour le système hydrogène, car il faut impérativement une couverture efficace au dessus du réservoir, pour que cette roche puisse jouer pleinement son rôle de

² FCNP : = front de chevauchement nord-pyrénéen

réservoir et d'accumulation d'un volume commercial d'H₂. Sinon, les fluides (gaz, huile, H₂) ne feront que transiter lors de leur migration « per ascensum ».

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



Charte lithostratigraphique avec marqueurs sismiques classiques et **réservoirs potentiels** avec leurs couvertures respectives 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 : exemples dolomies de Mano et Meillon et calcaires barrémiens, surmontés d'une couverture 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 !). 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

On l'a dit : pour qu'une accumulation soit préservée dans un piège, il faut qu'il y ait au-dessus une roche couverture efficace (ou latéralement des failles étanches). 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 similaires.

Les roches couvertures classiques du système pétrolier sont a priori aussi candidates pour le système hydrogène. Parmi les roches couvertures les plus efficaces, on retrouvera donc les niveaux d'évaporites et les niveaux d'argiles saturées en eau.

Nous venons de voir précédemment que 2 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. Elles 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 cavités salines sont d'ores et déjà en fonctionnement (Angleterre, Texas).

Dans le bassin de Mauléon, les évaporites du Trias sup. se trouveraient entre 2800 et 5000 ++ m de profondeur. Mais :

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.

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 qui sont aussi des chemins de migration potentiels pour l'hydrogène.

Les argiles

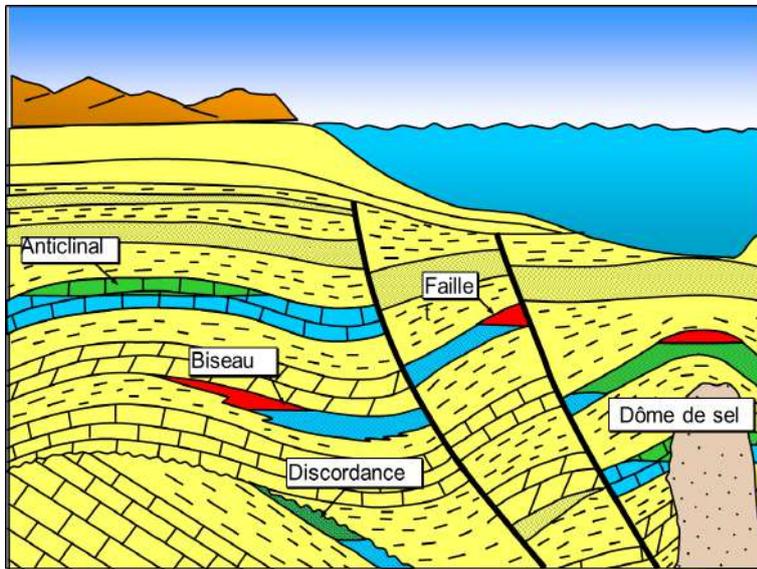
Les marnes de Sainte Suzanne (argiles calcaires), d'âge Aptien inférieur, constituent la couverture ultime des réservoirs à gaz de Lacq profond. Il faut remarquer qu'en tant que couverture, quelques centaines de mètres de marnes de Ste Suzanne sont capables de « retenir » des accumulations de gaz naturel 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.

3- 2-6 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 pourraient se trouver des accumulations commerciales d'hydrogène.

Un piège est une structure géologique impliquant un réservoir et sa couverture ; a priori, ceux pour l'hydrogène seraient similaires à ceux du système pétrolier. Voir le schéma ci-dessous.



*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.

Pièges associés à un dôme de sel : anticlinal formé à l'aplomb du dôme, ou piège contre le dôme de sel.

Tous ces types de pièges sont transférables dans le système hydrogène (rouge = gaz, vert = huile). D'après AAPG.

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 les 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.

Dans cette configuration, 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 co-valorisation hydrogène + 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.

En résumé, il va falloir trouver des pièges structuraux, ou stratigraphiques, ou mixtes, qui incorporent :

- 1- grès ou dolomies du Trias inférieur /moyen surmontés des évaporites du Trias supérieur. 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 approprié (ex. migration profondeur avant stack) devraient permettre de mieux imager la base du sel.
- 2- une combinaison similaire à celle du gisement de gaz à Lacq, dolomies de Mano / calcaires barrémiens surmontés par les Marnes de Ste Suzanne. 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. 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 « diapirs de sel », même très déformés par la tectonique, assurant latéralement la couverture étanche, ce qui représente une autre configuration de pièges potentiels. Les flancs d'un dôme de sel sont toujours difficiles à imager en sismique surtout en 2D.

3- 2-7 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 a priori privilégiés pour la migration de l'H₂ vers la surface, y compris en passant à travers les épaisses couches d'évaporites du Trias sup.

Mais pour former des accumulations d'H₂, il est nécessaire que cet H₂ 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.

3-2-8 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 indiquer s'il existe des accumulations ou flux exploitables commercialement, car ces émanations prouvent justement que l'hydrogène est capable d'arriver en surface, sans avoir été retenu dans un piège se trouvant sur ses chemins de migration.

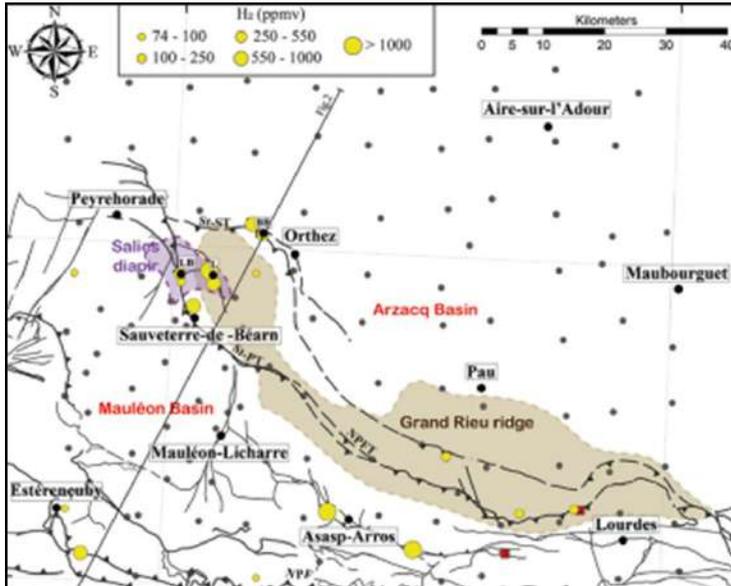
A notre connaissance, en 2020-2022, c'est la première fois qu'une étude et mesures dans les sols de l'hydrogène et gaz connexes a été réalisée dans le piémont pyrénéen (dans le cadre de la thèse de N. Lefeuvre).

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 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).

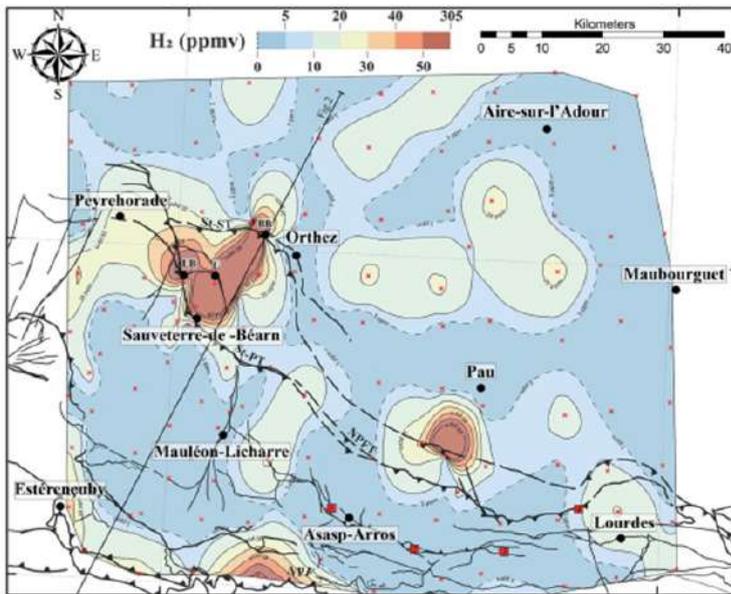
Les anomalies d'H₂ se corrèlent relativement bien avec les anomalies de CO₂ et de Radon, et semblent toutes associées à la présence de failles de chevauchement émergeant en surface. Cela conforte le scénario de migration de ces gaz le long des failles, où le CO₂ joue le rôle de « transporteur » pour 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 et de sa grande capacité de diffusion.

Pour le radon, il a déjà été prouvé ailleurs qu'il 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 « diapir » de Salies de Béarn et le long du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen (au niveau de Sauveterre de Béarn) constituent une preuve supplémentaire de l'existence de circulations actives de fluides dans des formations géologiques profondes.

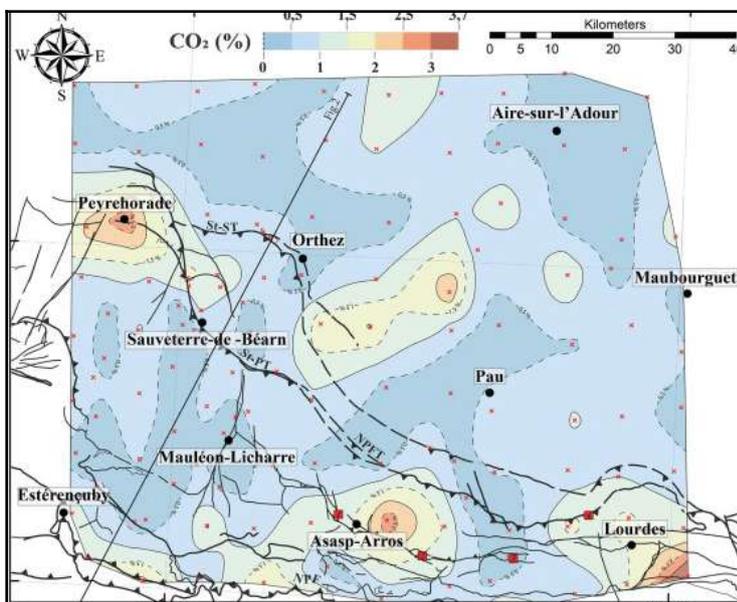
(voir pages suivantes : cartes des prélèvements de gaz, thèse de N. Lefeuvre, 2022)



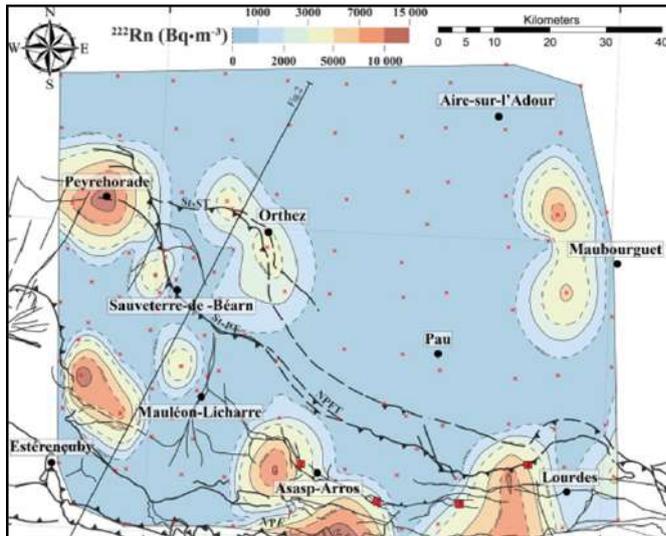
Carte des **prélèvements de gaz** dans les sols (points noirs selon une grille d'environ 10 X10 km). A noter la présence de plusieurs points anormaux (points jaunes) à proximité de Sauveterre de Béarn, mais surtout du Front de Chevauchement Nord Pyrénéen. On voit aussi des « hot-spots » dépassant les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



Concentration d'**H₂** dans les gaz prélevés dans les sols, présentés sous forme de contours. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.



Concentration de **CO₂** dans les gaz prélevés dans des sols. Les anomalies CO₂ ne se superposent pas exactement avec les anomalies d'H₂, mais restent associées à des chevauchements. A noter des hot-spots dépassant 10.5 % de CO₂ pour un cut-off de 3%. D'après N. Lefeuvre, thèse Grenoble, 2022.

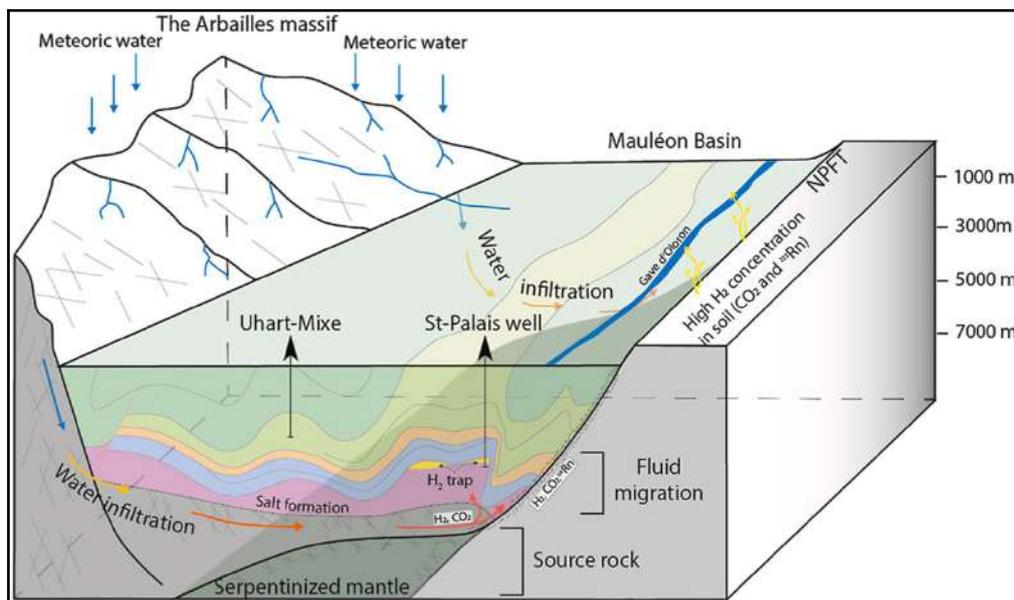


Concentrations de **Radon** (un gaz radioactif) prélevé dans les gaz des sols. A noter des anomalies dépassant 57 300 Becquerel/m³ pour un « cut-off anomalique » à 4 200 Bq/m³. Ces anomalies de Radon ne se superposent pas exactement aux anomalies d'H₂, mais restent aussi associées à des chevauchements.

D'après N. Lefevre, thèse Grenoble, 2022.

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

Au final, le système hydrogène du bassin de Mauléon peut se résumer par le bloc diagramme suivant :



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

Avant de faire le bilan sur le système hydrogène dans le bassin de Mauléon (et éventuellement dans les chaînons béarnais), il faut se poser trois questions toutes simples, mais fondamentales :

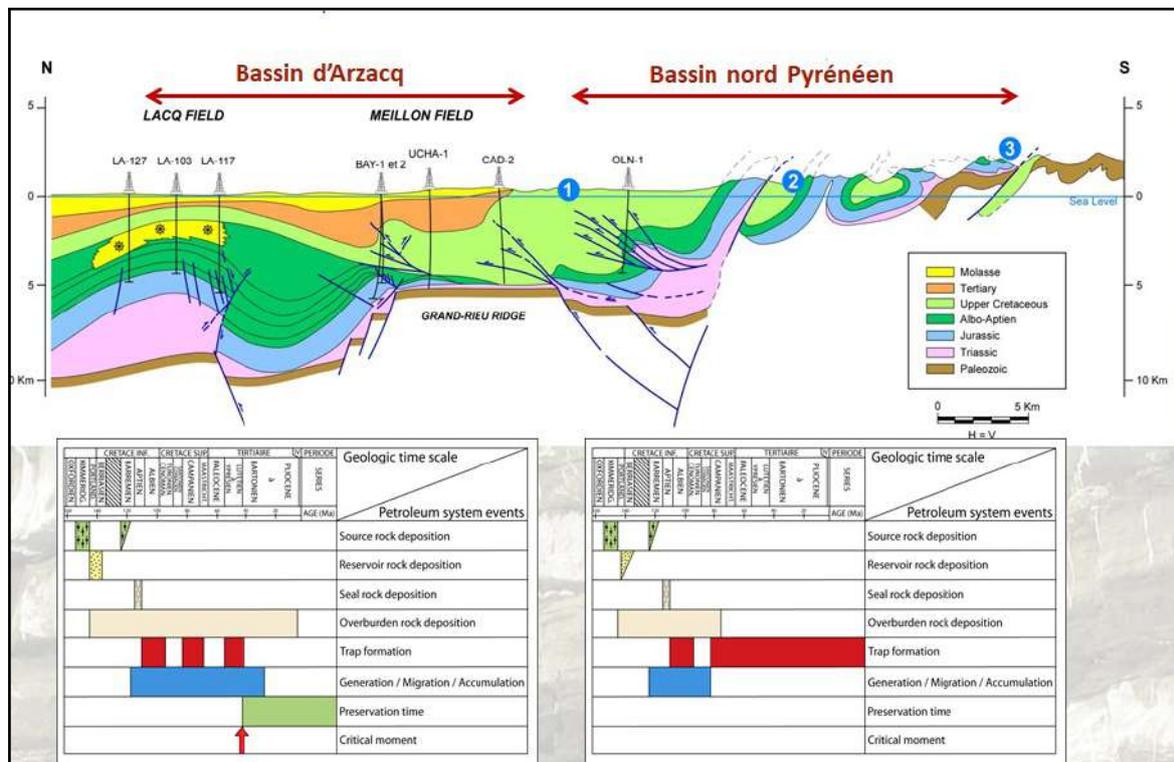
- pourquoi les forages pétroliers (une dizaine) dans le bassin de Mauléon ont tous été des échecs, ce qui contraste avec les succès du bassin d'Arzacq voisin ?
- par voie de conséquence, qu'est ce qui n'aurait pas fonctionné dans ce système pétrolier du bassin de Mauléon ?
- quelles sont alors les conséquences 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 à la suite sont une sorte de charte ou « check-list » souvent utilisée par les explorateurs pétroliers pour présenter et résumer les éléments, les processus, et surtout la chronologie des événements qui construisent -ou pas- 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) se produisent alors que les pièges se forment, facilitant ainsi leur remplissage en hydrocarbures. Et surtout les pièges restent préservés jusqu'à nos jours. Les gisements (Lacq, Meillon, ...) sont là pour le prouver.

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. 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. En d'autres termes : si des gisements d'hydrocarbures ont existé dans le passé lointain, ils 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 pour le système hydrogène du bassin de Mauléon ?

Pour résumer : 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 ont

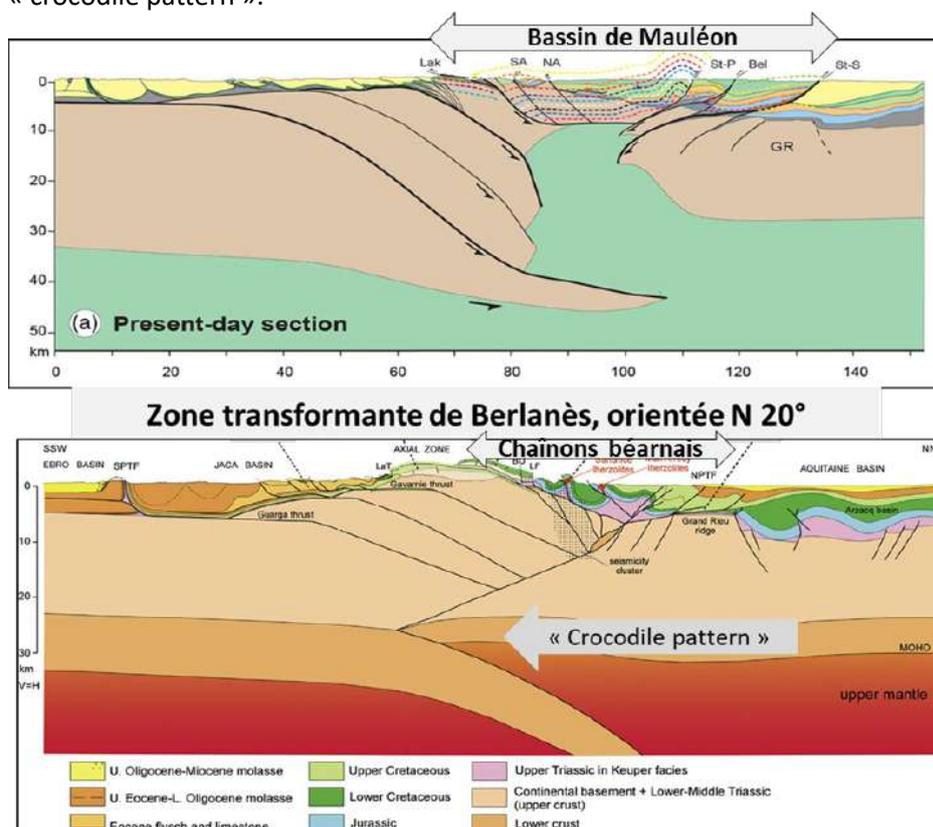
été encore bien plus affectés par la tectonique pyrénéenne que le bassin de Mauléon, qui a subi « seulement » une inversion tectonique.

Les pièges anté-salifères sont a priori moins concernés, donc moins risqués, car les épaisses couches d'évaporites, sont par leur nature plastique 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 dissipation actuelle de l'hydrogène.

5 - Potentiel hydrogène des chaînons béarnais

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

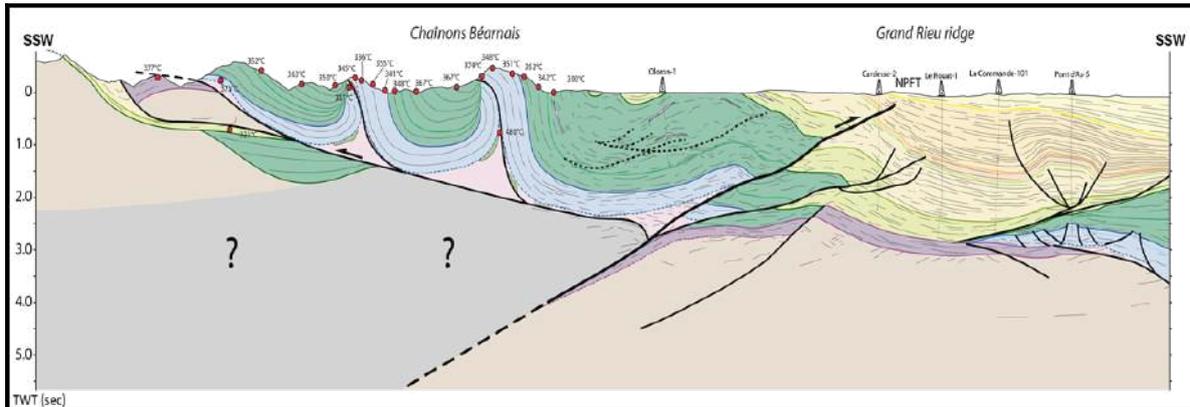
Tout d'abord, les structures profondes sont différentes de part et d'autre de la zone transformante de Berlanès qui sépare ces deux domaines. Le manteau est bien plus profond dans les chaînons béarnais (~ 25 km à comparer aux ~ 10 km dans le bassin de Mauléon), et la suture entre les 2 plaques européenne 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 du 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 ; il 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. Mais les travaux de prospection dans les PER de Grand Rieu et Coucourou permettront peut être d'apporter prochainement de bonnes nouvelles sur ce sujet. Lisez la République des Pyrénées !



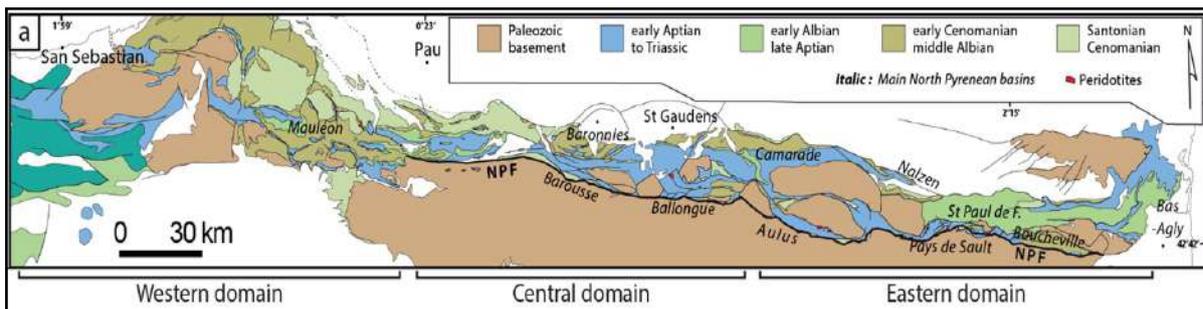
Coupe géologique à travers les chaînes béarnaises (PER de Couroucou), montrant la complexité des structures tectoniques, avec du sel triasique discontinu, impliqué dans les structures tectoniques créant ainsi des trous dans le tapis de sel. D'après Ducoux, présentation « Thermal records of hyperextended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

6 - Potentiel hydrogène du bassin des Baronnies / Comminges

(nord de St-Gaudens)

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

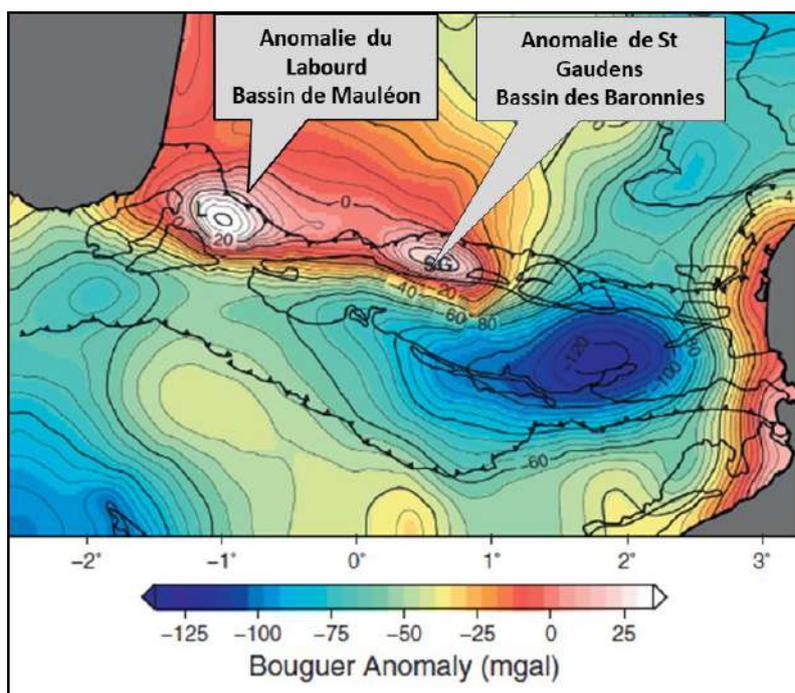
Une demande de PER a été faite par les sociétés iséroises Mantle8 et G&OL sur une zone couvrant ce bassin au nord de St-Gaudens.



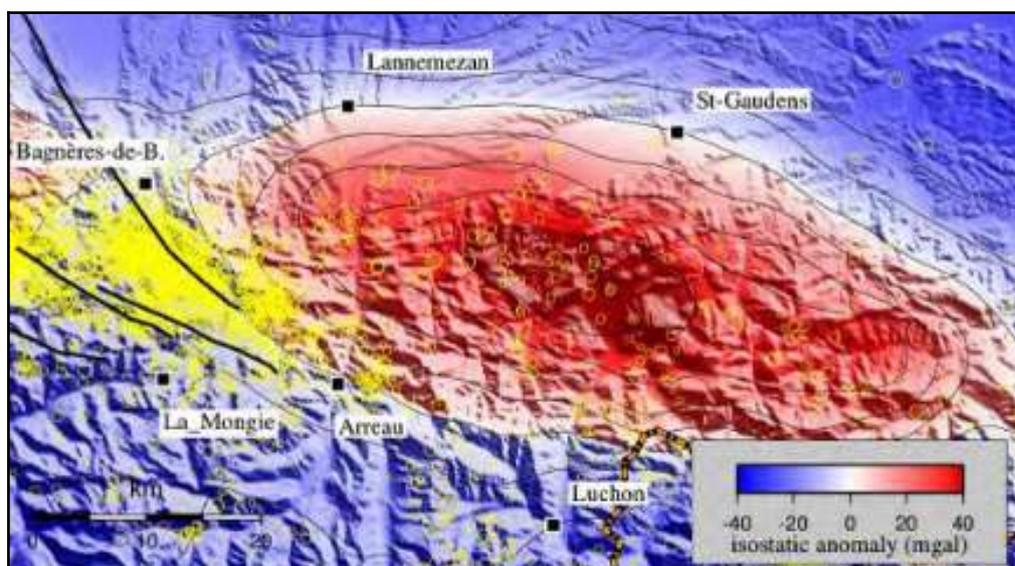
Carte géologique des bassins Crétacé jalonnant l'ancien rift, sillon flysch, long de la Zone Nord Pyrénéenne, en particulier le bassin des Baronnies/Comminges, présentant des similitudes avec le bassin de Mauléon pour la prospection hydrogène. D'après Clerc et al, 2015

Cette anomalie gravimétrique est située à l'aplomb du bassin sédimentaire des Baronnies-Comminges. Majeure, elle trahit l'existence d'un important excès de masse dans le sous-sol, lui même très probablement lié à la présence d'un corps dense de grandes dimensions, « enchâssé » 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 sera ensuite poussé vers le nord lors de la phase de compression pyrénéenne, via le Front de Chevauchement Nord Pyrénéen, pour se trouver dans sa position allochtone actuelle. Profondeur de 8 à 16 km ?

(... 6 – bassin des Baronnies / Comminges ...)

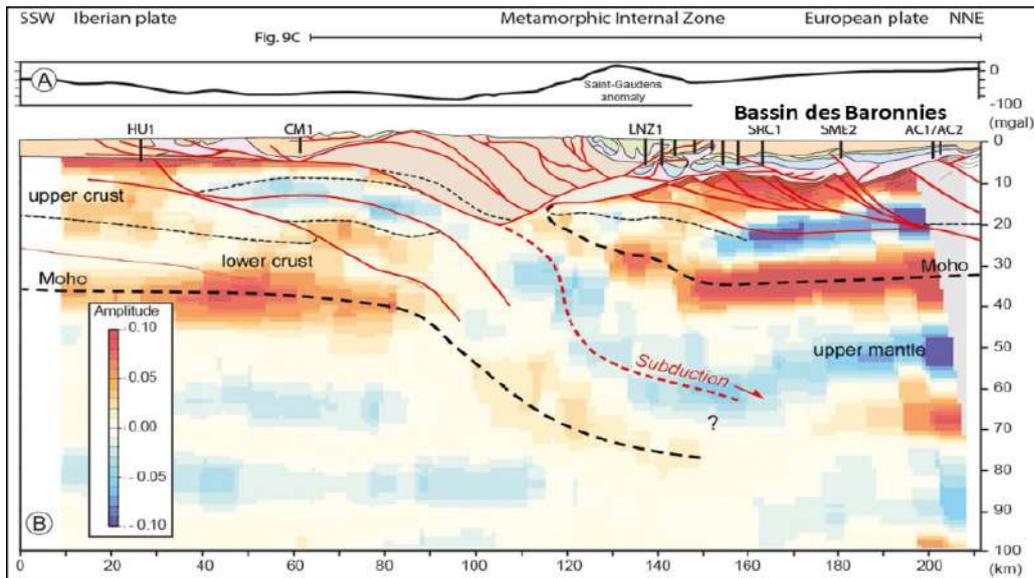


Carte gravimétrique, anomalie de Bouguer, corrigée de la contribution des racines crustales et des sédiments. D'après Saspiturry et al 2019

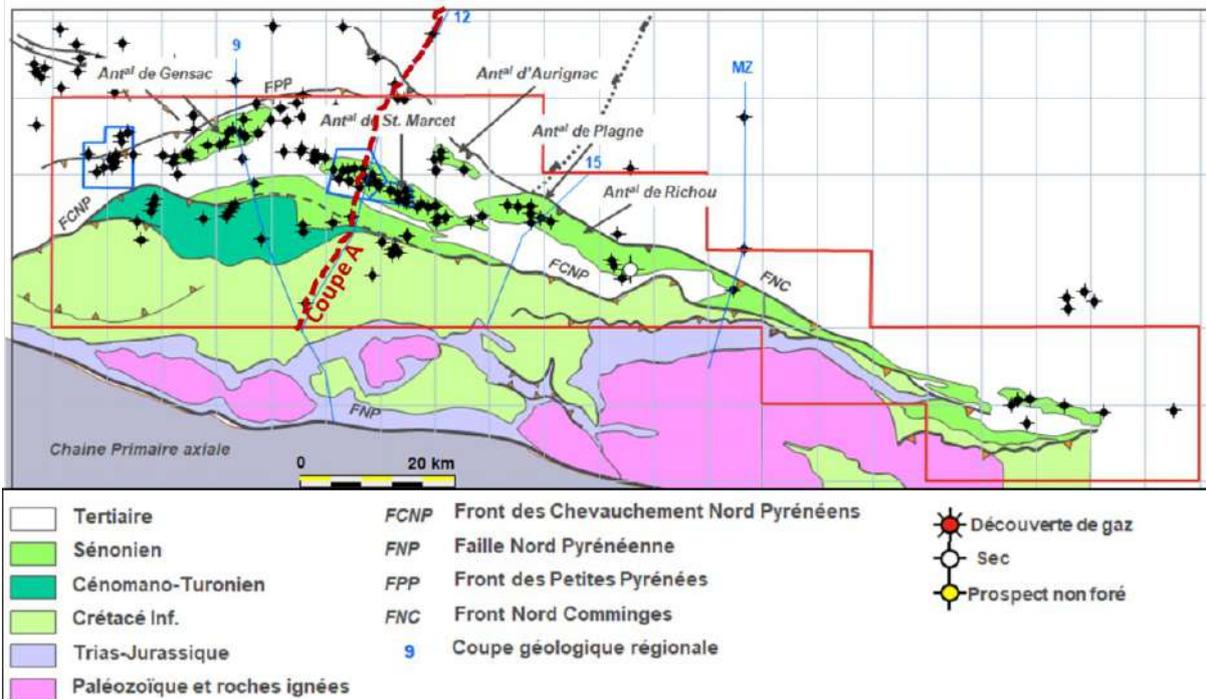


Zoom sur l'Anomalie gravimétrique positive de St Gaudens, en contours rouges. D'après publication Expérience PICSO du réseau de surveillance de la sismicité des Pyrénées. Projet d'imagerie sismologique du Comminges, avril 2024

(... 6 – bassin des Baronnies / Comminges ...)

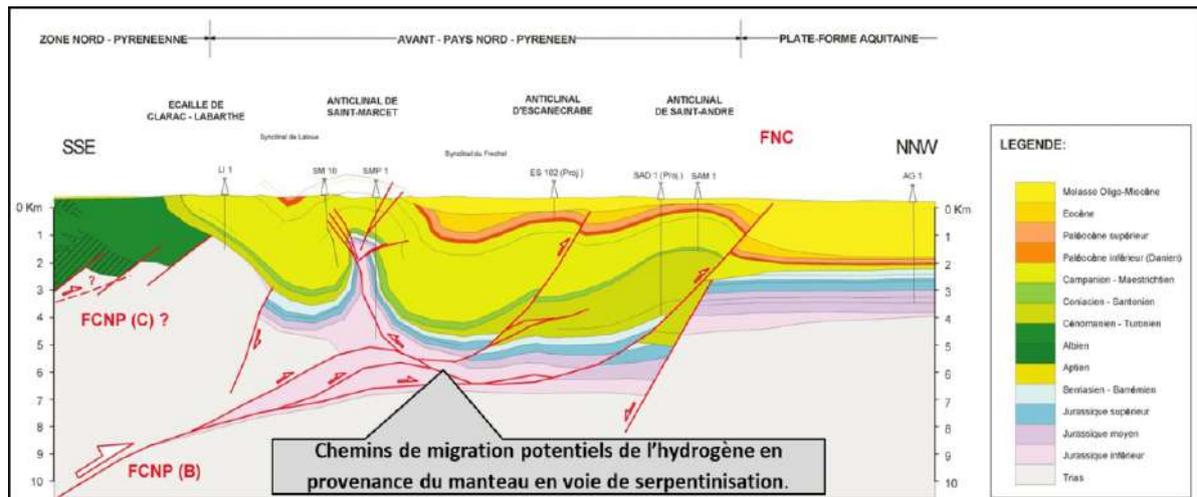


Anomalie de Bouguer (d'après Espurt et al, 2019) montrant la présence sous le bassin des Baronnies d'un corps allochtone composé de roches du manteau, résultant en une anomalie positive (en rouge). Forages pétroliers du bassin des Baronnies : Lannemezan 1 (LNZ1), Sariac 1 (SRC-1), Saint Médard 2 (SME-2),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



Carte géologique schématique du bassin des Baronnies/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, mais dans ce qu'on appelle les « Petites Pyrénées » (entre Front de chevauchement Nord Pyrénéen et Front des Petites Pyrénées), qui chevauchent sur la partie sud du bassin d'Aquitaine – doc. Total, courtoisie JJ. Biteau.

(... 6 – bassin des Baronnies / Comminges)



Coupe géologique A, transverse au bassin du Comminges, équilibrée, régionale. 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 JJ. Biteau.

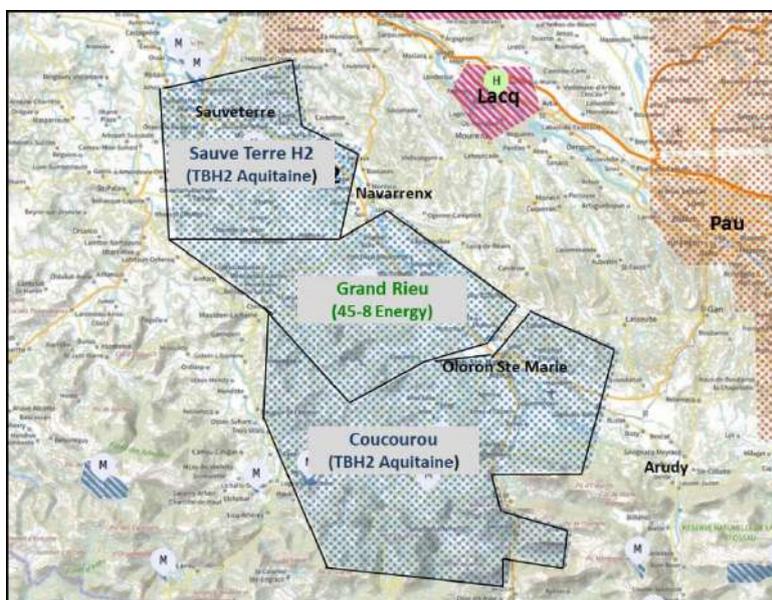
D'un point de vue géologique on retrouve des similitudes intéressantes avec le bassin de Mauléon :

- structures tectoniques 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. Il n'y a pas d'hydrogène dans le gisement de gaz naturel de St Marcet, et la présence d'hydrogène n'a pas été signalée dans les anciens puits (à une exception près ? mais à vérifier). Ce qui signifierait que l'hydrogène n'est pas parvenu dans les pièges pétroliers, qui eux ont pourtant fonctionné pour piéger le méthane.
- on peut alors espérer que l'hydrogène, si génération il y a, est resté piégé sous les évaporites du Trias Sup. Cependant, le sel est souvent mobilisé et il est impliqué dans certaines structures. Cela augmente le risque de ne pas avoir des formations évaporitiques continues et étanches assurant une bonne couverture (les fameux trous dans le tapis de sel). Ces cibles hydrogène sous le sel triasique constituent donc les seuls objectifs 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 : en cas de résultats positifs, cela démontrerait qu'un système hydrogène est en fonctionnement, et réduirait les risques d'exploration pour l'hydrogène.
- l'exploration de l'hydrogène dans ce bassin comporte les deux mêmes handicaps que dans le bassin de Mauléon : difficulté de bien imager la base du sel en sismique pour bien identifier des pièges structuraux potentiels - profondeur des objectifs, synonymes de coûts élevés pour les forages.

7 - 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. 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, et renouvelable une fois. 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 de 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) ; début 2025, ils en sont à des étapes différentes de la procédure d'attribution.



Carte (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.

7-1 Le PER « Sauve Terre H2 »

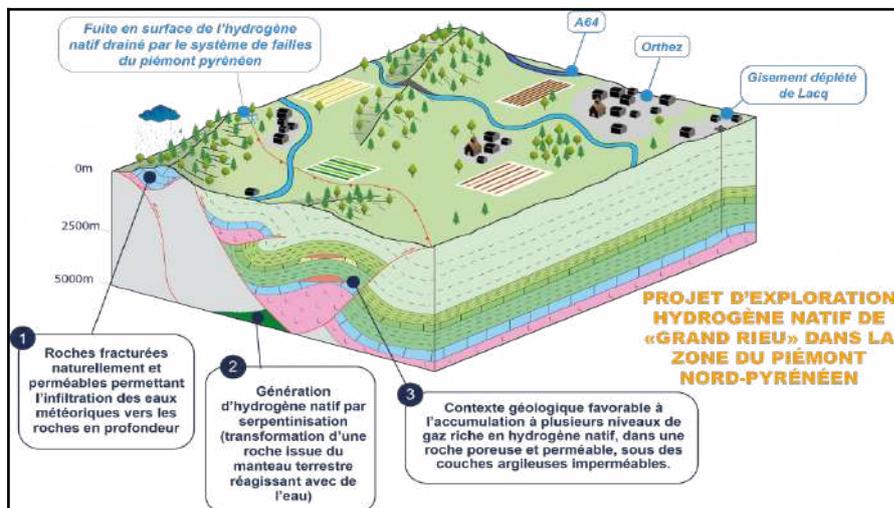
Le premier Permis Exclusif de Recherche pour l'hydrogène dans les Pyrénées, et aussi le premier en France, a été obtenu le 3 décembre 2023 par la société TBH2 Aquitaine qui est une filiale de Terrensis, une société pionnière dans ce domaine.

La superficie de ce PER est de 225 km², il est valide jusqu'à fin 2028.

Rendez-vous dans 3 ans pour savoir si les recherches ont été fructueuses, et si 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, 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 en association avec Storengie, une filiale d'Engie. Rendez-vous donc en 2029.



Bloc diagramme 3D, résumant les caractéristiques et les enjeux du PER Grand Rieu - D'après le site de 45-8 Energy

7-3 Le PER Coucourou (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. 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. A ce stade TBH2 n'a rien publié sur site internet.

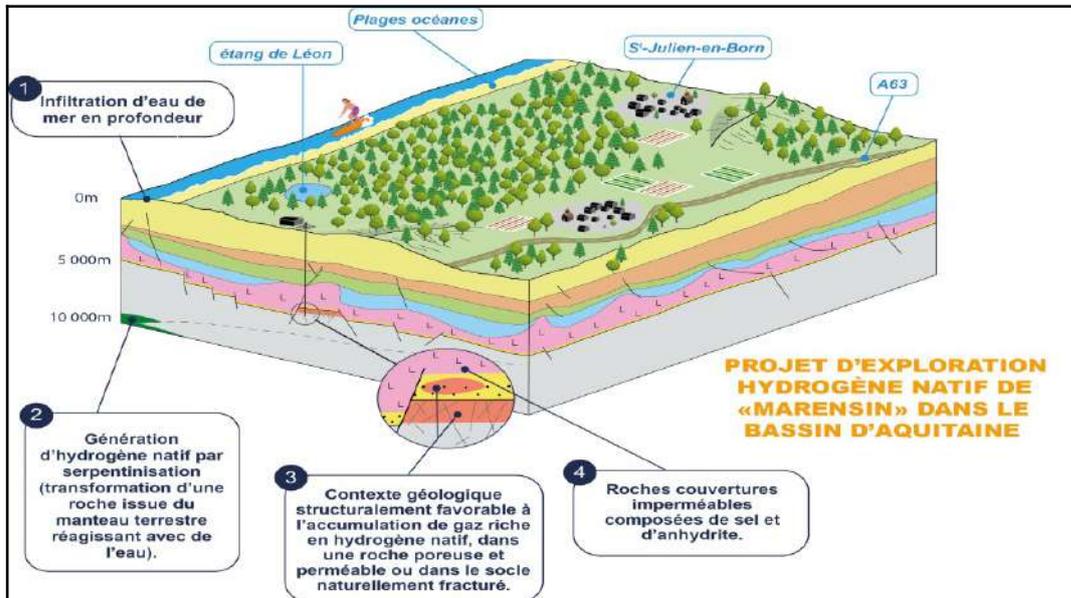
7-4 Le PER de Marenzin (Landes)

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

Storengy et 45-8 ENERGY ont déposé conjointement une demande sur une zone de 691km² dans le département des Landes (40) pour une durée de 5 ans. Storengy est opérateur sur ce permis.



Localisation du PER de Marenzin, sur la côte atlantique des Landes.

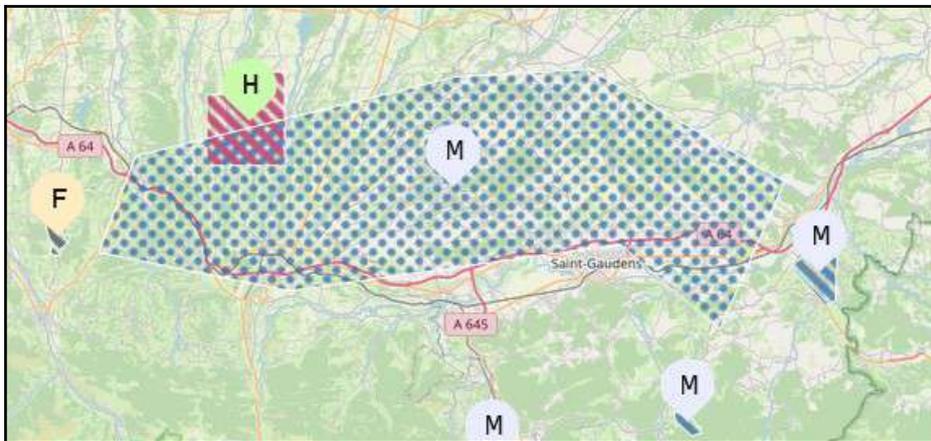


Bloc diagramme 3D, illustrant le système hydrogène du **PER de Marensin**. D'après le site de 45-8 Energy.

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 la présence d'indices d' H_2 dans l'ancien puits de Contis est un élément encourageant.

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

Ce PER a été demandé par les sociétés basées près de Grenoble, Mantle8 et G&OL (qui peut se prononcer Géol ?). Il 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 française.

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

8 - Conclusions

Par analogie au système pétrolier, nous avons donc défini les éléments et processus du système H₂ à appliquer et 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 et les chaînons béarnais), couvert 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 serpentinisation, génératrice d'hydrogène,**
- par **l'infiltration d'eaux météoriques via 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 serpentinisation du manteau générant de l'Hydrogène. La micro-sismicité actuelle indiquerait que ces failles sont toujours actives.
- 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 pourrait anticiper similaires pour un système hydrogène ? **Ces thèmes d'exploration sont donc très risqués et non prioritaires.**
- mais aussi des nouveautés favorables pour l'hydrogène en particulier des **réservoirs et pièges anté-sel triasique, 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 ou les pièges anté-salifères qui pourraient exister à des profondeurs moindres, pour être testés par forage à des coûts raisonnables. Mais des incertitudes subsistent quant à la qualité des réservoirs gréseux du Trias inf.
- 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, 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), 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, prouvent qu'un **système hydrogène natif fonctionne localement.**
- mais toutefois sans garantie que des accumulations commerciales existent.

Le **bassin du Comminges / Baronnie**, couvert en grande partie par le PER de Mantle8, présente des similitudes avec celui 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 - dans ce bassin le système pétrolier a bien fonctionné, mais pas d'hydrogène (sauf une exception à valider ?) 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 du Trias**, mais avec le problème récurrent des difficultés à

identifier ces pièges en sismique, et la profondeur de ces objectifs avec des coûts importants pour les forages.

Seuls 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 : c'est une des conditions de la vulgarisation scientifique. Compte tenu du sujet abordé, nous avons sollicité plusieurs relecteurs et correcteurs avec des profils variés :

Nous remercions chaleureusement nos anciens collègues Jean-Jacques Biteau 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 Benoît Hauville, également ancien de TotalEnergies, actuellement directeur général de 45-8 Energy (une des sociétés détentrices du PER de Grand Rieu) pour ses échanges fructueux.

Ce module est dédié à Jean-Jacques Biteau, disparu le 3 mai 2025.

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'H2 ?** 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>
- **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>
- **Les processus de serpentinitisation 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>
- **Livret-guide de l'excursion EAGE, 1 et 2 juin 2025 - Exploring natural hydrogen in the Pyrenean piedmont: from source rocks to reservoirs** (Charles Aubourg, Marc Blaizot, Sabine Delahaye, Gilles Fabre, Emmanuelle Baudia, Nicolas Gonthier)
https://drive.google.com/file/d/112UTrK7lzORoMXThKCzVdZSrSci1f6Au/view?usp=drive_link

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>

Pour accéder à la base **Minergies** des anciens puits pétroliers :

<https://www.minergies.fr/fr>

Des vidéos intéressantes et sérieuses

- **Vidéo , survol de la terre et localisation des ronds de sorcières / cercles de fées.**
Cliquer sur le lien, puis dérouler le texte jusqu'à trouver la vidéo « Movie S1 » incluse dans le texte
<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 octobre 2024
<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 de 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=4Nlz3IUwAE>
- Vidéo : Hydrogène, la révolution verte ? | Documentaire CNRS
<https://www.youtube.com/watch?v=wNJEL2hUQ5E>