

Journées du Climat

Vers une économie Hydrogène ?

Premiers pas dans l'exploration de l'hydrogène naturel :
contextes géologiques et exemples du Sud-Ouest de la France

Marc Blaizot

CPIE

Hendaye, le 11 octobre 2025

Lherzolites –Col d'Urdach-



Plan de la présentation

L'hydrogène pourquoi faire ? Utilisations actuelles et ...futures

L'hydrogène: caractéristiques physico-chimiques

Les différentes couleurs de l'hydrogène et leurs plus et moins

L'hydrogène naturel : les occurrences géologiques

Le système hydrogène naturel : de la génération au piégeage ou à la perte

L'exploration : exemples du Sud-Ouest de la France

Conclusions : l'hydrogène naturel : tout reste à prouver !

L'hydrogène ça sert à quoi ?

Aujourd'hui 80 Mt/a de production : matière première avec deux utilisations essentielles (40/40)

-**la désulfuration des pétroles** lors du raffinage : le traitement produit de l'H₂S ensuite traité aux amines pour former du soufre solide pour la thiochimie (Lacq)

-**la synthèse de l'ammoniac** précurseur de l'urée et des engrais azotés (NKP):

procédé Haber-Bosch (1913/BASF) : $N_2 + 3H_2 = 2NH_3$ importance économique considérable puisqu'il **nourrit le monde** (agriculture) avec 150 Mt/a mais est à lui seul responsable de 2% des émissions de CO₂

Demain, 500 Mt en 2050 : matière première et source d'énergie (soit en combustion directe soit pour électricité)

La verrerie, la cimenterie ou la sidérurgie : 1,8 Gt d'acier annuellement : remplacer le charbon/coke :

Minerais de fer + charbon = Fe liquide (fonte) + CO₂

Minerais de fer + H₂ = Fe liquide (fonte) + H₂O

Diminuerait les émissions mondiales de 3 à 4 Gt/an (près de 10 %)

Les transports électriques (1kg/100 km pour une voiture et

12 kg/100 km pour un (Fé)bus) : H₂ avec une PAC mais concurrencé par les batteries

Obligation : le stockage d' H₂ gazeux en sous-sol



Le stockage d'H₂ sous-terrain

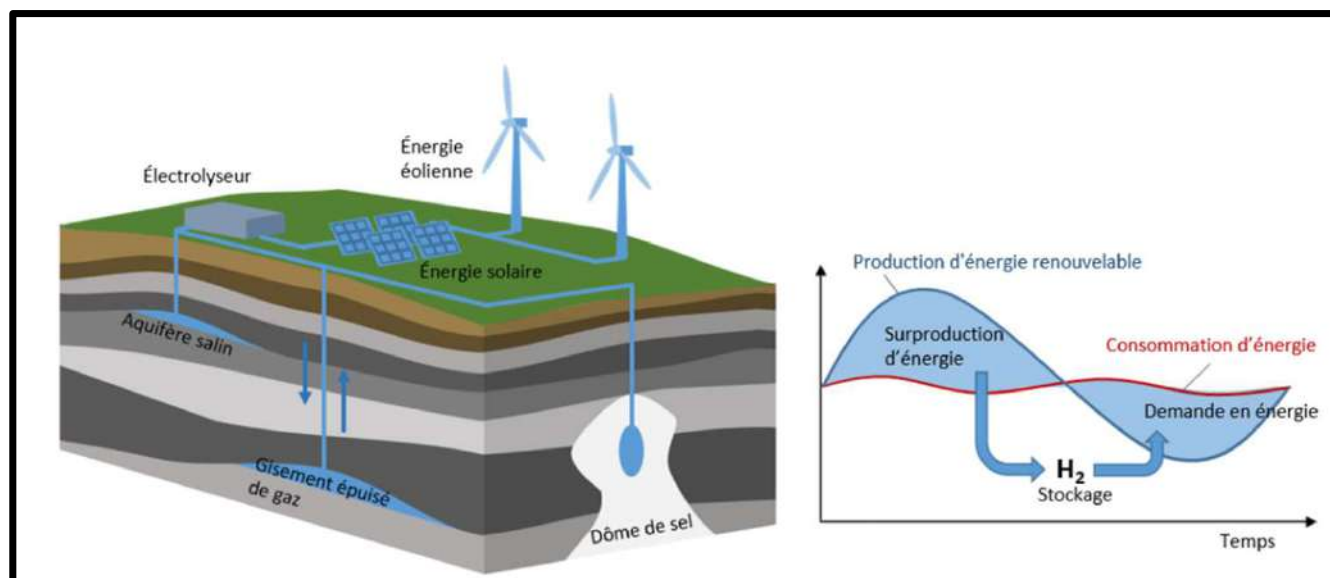
Caverne saline



- / Etanchéité assurée par les propriétés du sel
- / Stabilité du dihydrogène au contact du sel
- / Fréquence élevée de pompage d'hydrogène



- / Nécessité de construire des infrastructures
- / Analyses géologiques détaillées à réaliser pour chaque formation



Stockage de l'H₂ en couches salifères : principales périodes évaporitiques en France : Trias (Bassins parisiens et aquitains) et Oligo-Miocène (Sud-Est)

En Aquitaine, les dépôts et structurations des évaporites sont liés au climat du Trias puis de l'halocinèse (extension albo-cénomanienne et subsidence crétacée)

Les structures diapiriques pourraient être favorables au stockage d'H₂ en cavités salines

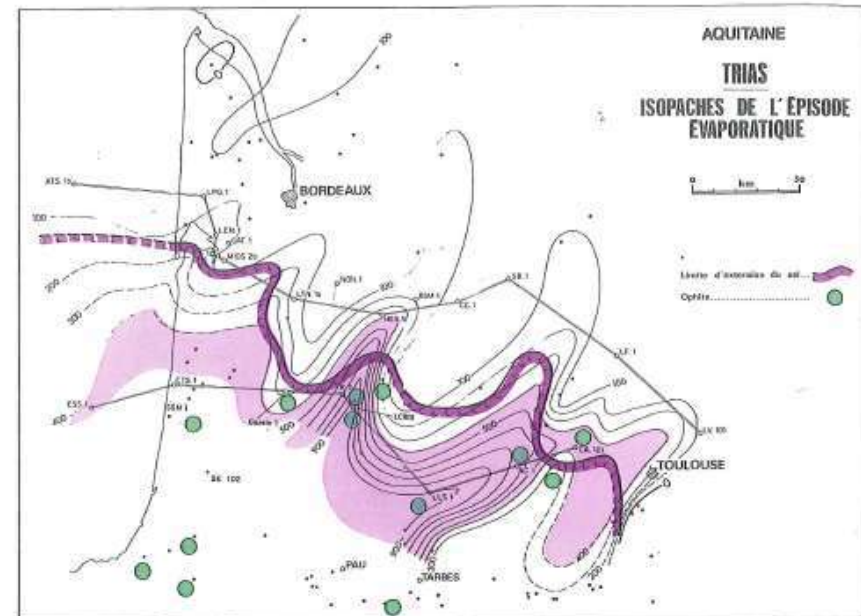
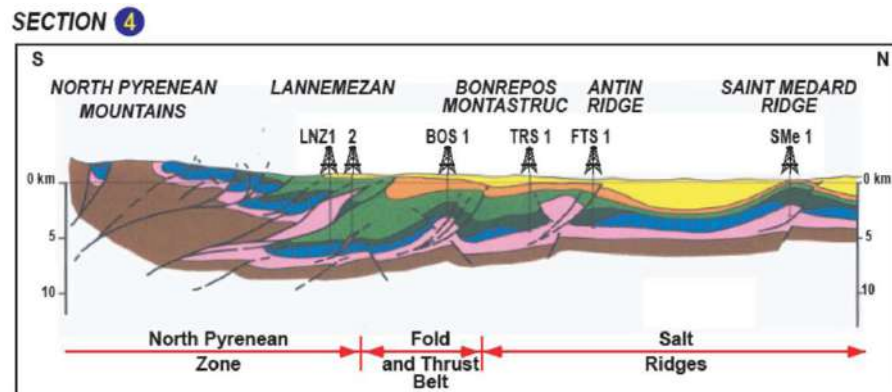
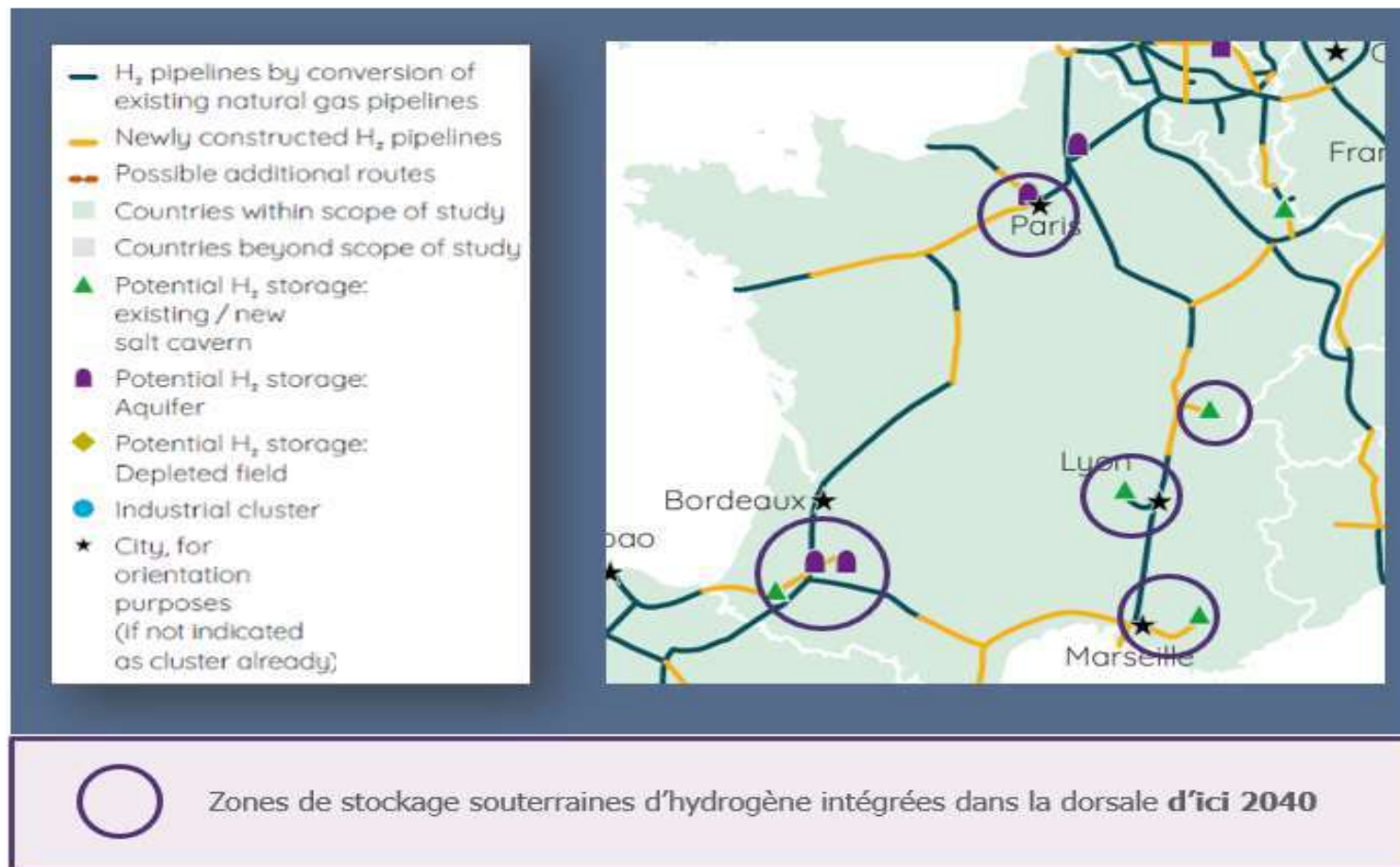


FIGURE 4
Trias : isopaches de l'épisode évaporitique
Triassic : isopachs of the evaporitic formations

Carte Isopaque et extension du Trias en Aquitaine : R Curnelle -1983
Coupe structurale Sud-Nord : JJ Biteau-2006

Vers une économie Hydrogène européenne ? Production, transports, stockages

Dorsale européenne de l'hydrogène en France en 2040



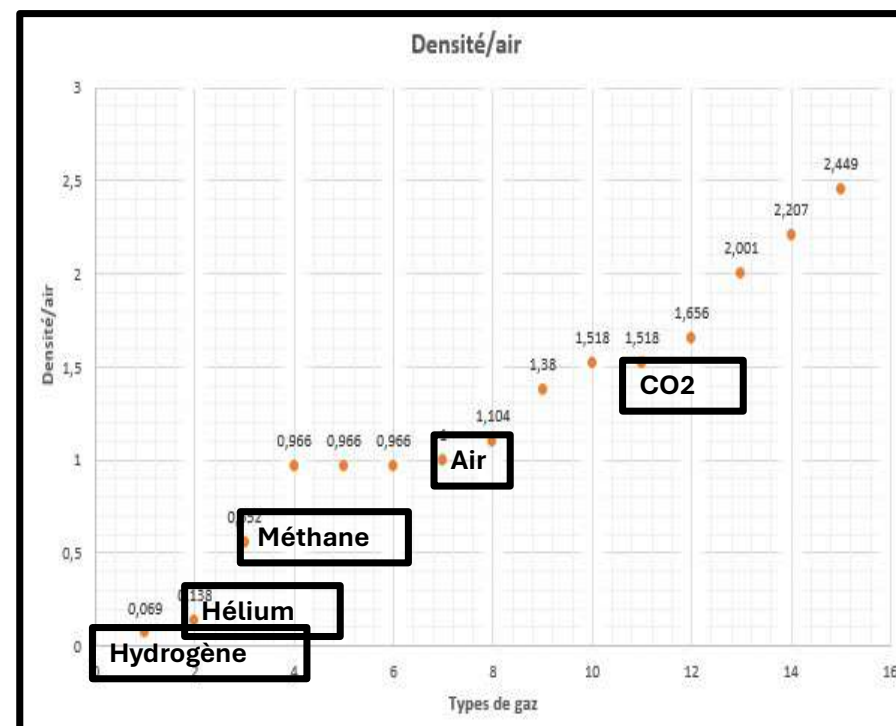
L'hydrogène c'est quoi ?

L'atome d'hydrogène H est un composant majeur de l'eau, des hydrocarbures et de la matière organique, est très répandu dans l'univers (la fusion atomique du soleil) et sur Terre,

Le gaz hydrogène (ou dihydrogène) est la molécule H_2 , inodore, incolore et insipide; il est très léger de densité 0,07 (air =1) à 0°C et 1 atm : c'est la plus petite molécule gazeuse, très volatile et donc difficile à contenir/piéger,

L'hydrogène est le plus inflammable de toutes les substances connues : DANGER : Dirigeable Hindenburg –NY-1937, après 67 vols transatlantiques, Capacité calorifique : 120 MJ/kg contre 50MJ/kg pour le méthane, 41 pour l'essence et 30 MJ/kg pour le charbon,

Elément particulièrement réactif avec O, S, N ou C,



Toutes les couleurs de l'Hydrogène !

Grey Hydrogen: vapo-réformage du méthane ou charbon (**98 % de l'H2 mondial**):

Blue Hydrogen: grey hydrogen avec Capture du CO2

Turquoise Hydrogen : Pyrolyse du méthane entre 1000 et 2000°C : $\text{CH}_4 = \text{H}_2 + \text{C}$

Green Hydrogen : électrolyse de l'eau avec électricité renouvelable décarbonée

Yellow Hydrogen: électrolyse de l'eau avec électricité nucléaire décarbonée

White Hydrogen : naturel, en sous-sol ,mais très rare gisement aujourd'hui (car peu recherché ?)

Orange Hydrogen :Hydrolyse du fer naturel par injection d'eau en sous-sol (R&D) : une solution fondée sur la nature (SFN) ?



Attention au GES

Le cas de l'H2 gris (98 % de l'H2 aujourd'hui)

Vaporeformage du méthane (ou charbon) : **$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$**

Très importantes émissions de GES : 11 tonnes de CO₂ pour 1t d'H₂

Prélèvement d'eau très important : 10 tonnes d'eau pour 1t d'H₂

Soit près de 1 Gt de CO₂ émis mondialement ou 3 % des émissions totales de CO₂ ou 2 fois les émissions totales de la... France !

Attention aux consommations en amont

Le cas de l'hydrogène vert

L'électrolyse de l'eau: $\text{H}_2\text{O} = \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$

c'est énormément **d'électricité** (50 MWh pour 1t) et beaucoup **d'eau** (9t pour 1t d'H₂) pour la fabriquer

En prenant 20 MW pour 10t/j (meilleur électrolyseur actuel)
80MT/a = **500 GW de capacité** = 10 fois le parc nucléaire français !

H₂ est un moyen de stockage (où?) lorsque l'électricité intermittente ou nucléaire est gratuite (dépasse la consommation) et là où l'eau (douce) est abondante....

Attention au rendement !!! le cas de l'hydrogène vert pour l'électricité

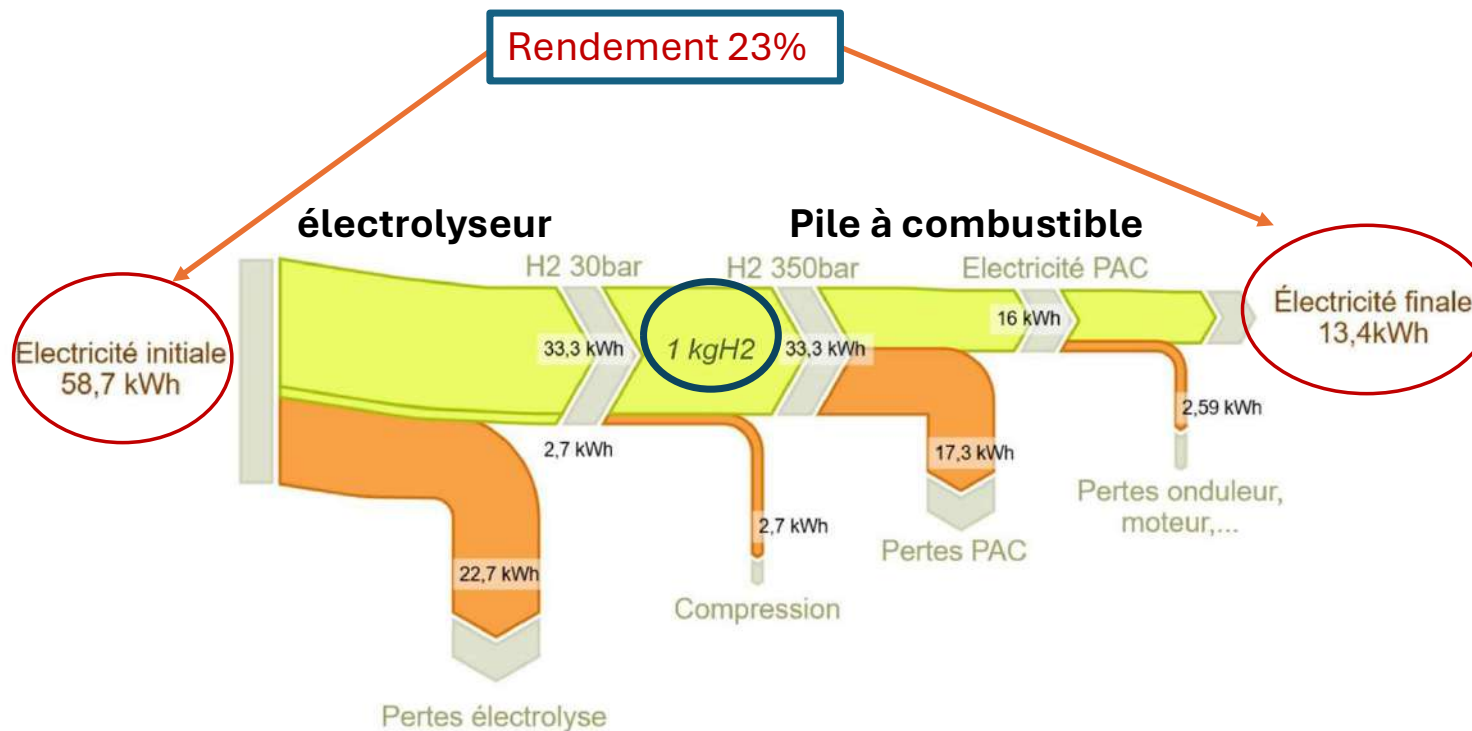


Figure 2 : Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire pour produire un kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique résultante.

Plan de la présentation

L'hydrogène pourquoi faire ? Utilisations actuelles et ...futures

L'hydrogène: caractéristiques physico-chimiques

Les différentes couleurs de l'hydrogène et leurs plus et moins

L'hydrogène naturel : les occurrences géologiques

Le système hydrogène naturel : de la génération au piégeage ou la perte

L'exploration : exemple du Sud-Ouest de la France

Conclusions : l'hydrogène naturel : tout reste à prouver !

Les occurrences naturelles d'H₂ (blanc)

Combien la Terre produit-elle d'H₂/an ? Chiffres très variables

Flux de H₂ dans l'atmosphère : 10 à 30 Mt/an dont 10 Mt/a dû au volcanisme

Hydrogène piégé en subsurface : 10³ to 10¹⁰ Mt

Or 10⁵ suffisent pour remplacer tous les fossiles par de l'H₂ pendant 200 ans !

Donc H₂ blanc mérite tout à fait de figurer en tête des solutions de Transition énergétique

Les 4 « gisements » d'H₂ naturel

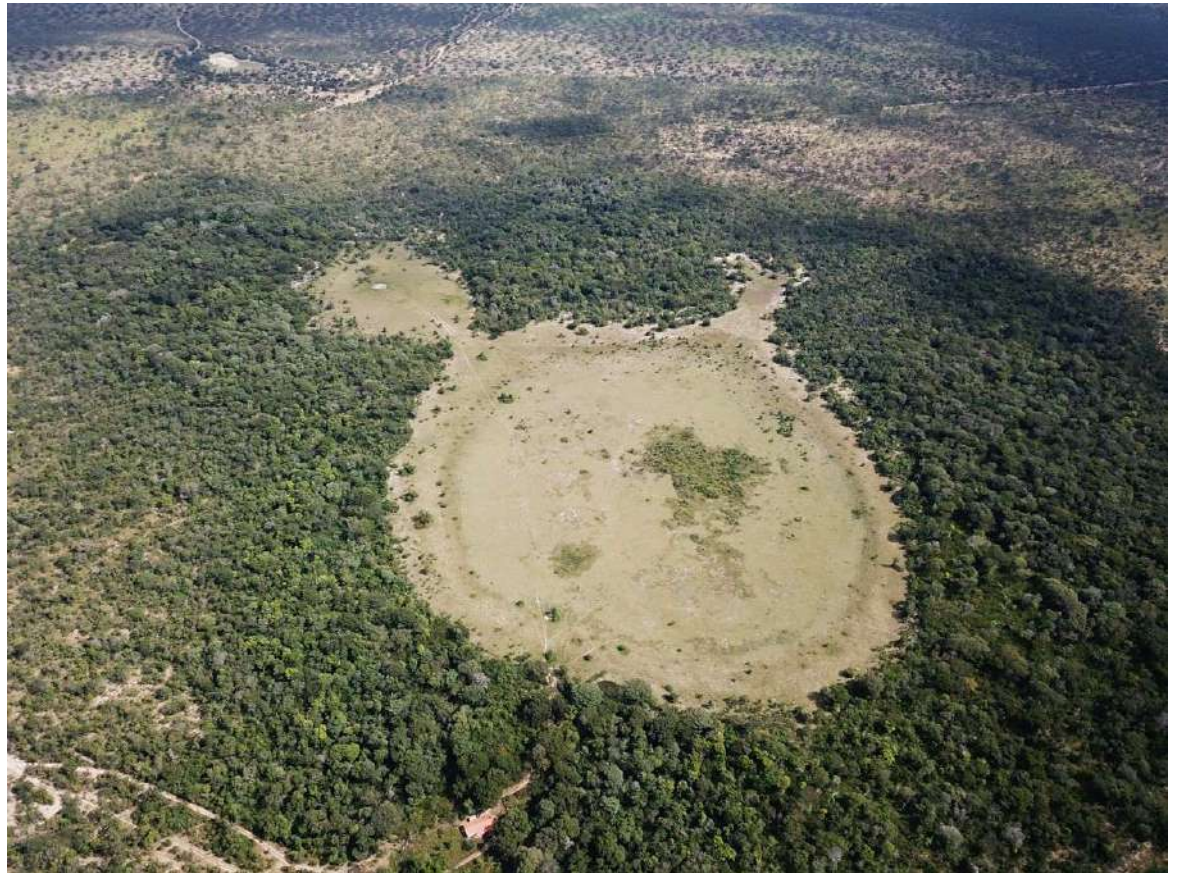
H₂ : émanations gazeuses dans les sols et vers l'atmosphère

H₂ dissout dans l'eau

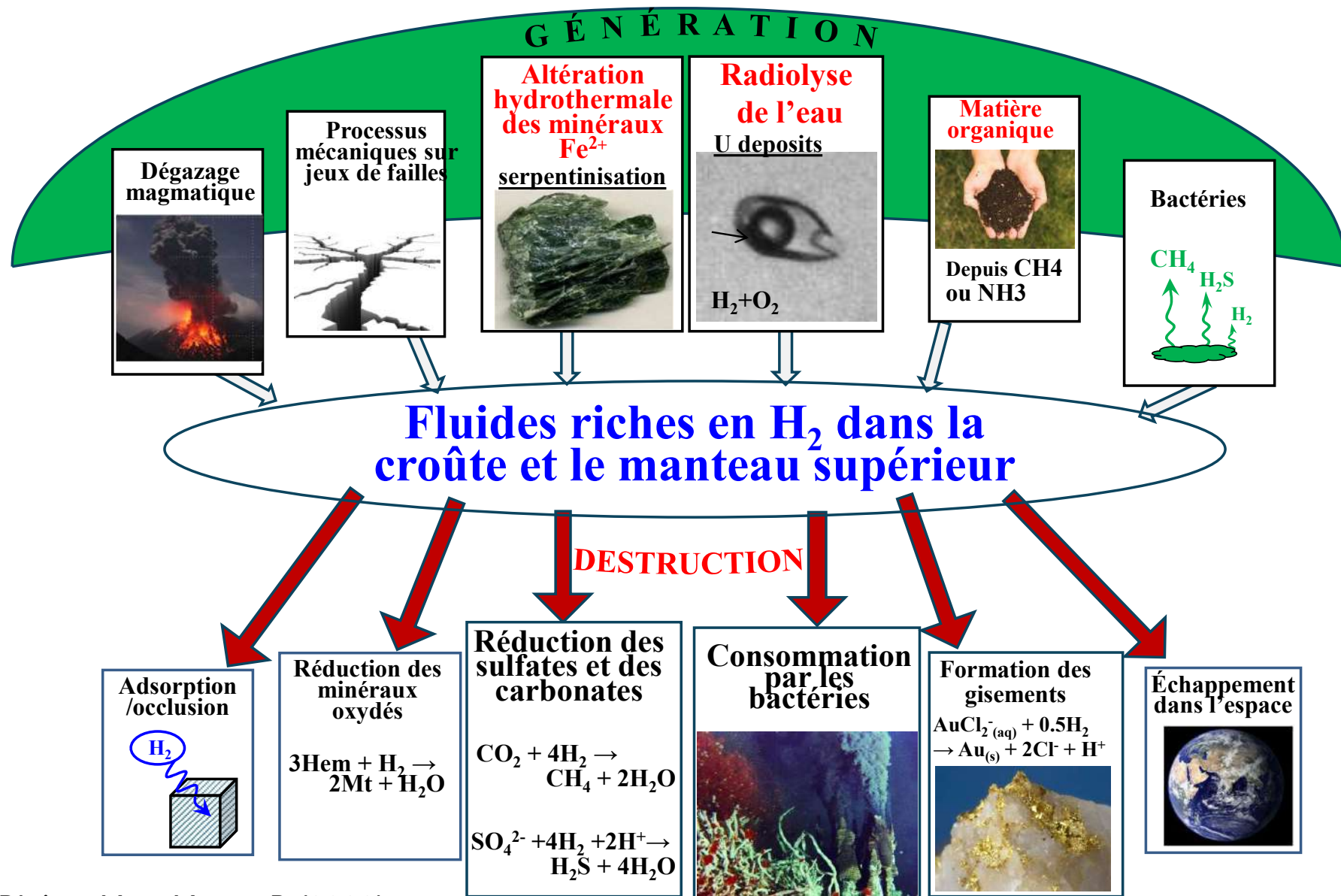
H₂ adsorbé dans les charbons

H₂ gazeux en pièges stratigraphiques ou structuraux (associés ou non à d'autres gaz)

Des manifestations /émanations très riches en H_2
en contexte ophiolitique (Chimère- Turquie) et en contexte de bouclier très ancien
précambrien (Sao Francisco-Brésil)



Flux : 15000 m³/j/km²



D'après Blaizot, M. et Masse, P. (2022)-

La génération d'H₂ : trois modes principaux

Oxydation



Roches riches
en Fe²⁺

Temperature

100°C–350°C

water



Radiolyse



granits



Pyrolyse



Shistes riches
en matières
organiques

200°C–300°C



D'après Aubourg C. and Blaizot, M. (2025)-EAGE TOULOUSE Field trip-

L'altération des péridotites

• Les olivines ou péridots forment une série continue entre :

La forstérite : Mg_2SiO_4 et la fayalite : Fe_2SiO_4

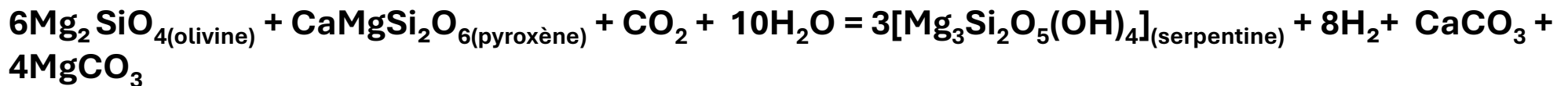
Les olivines suivent la **loi de Goldich** : « les minéraux sont d'autant plus vulnérables que leurs conditions de genèse en profondeur diffèrent fortement de celles qui règnent à la surface ». Étant formées à haute température et en absence d'eau, les olivines sont très sensibles aux agents atmosphériques : l'hydratation, l'oxydation, la silicification ou la carbonatation.

En présence d'eau, et entre 200 à 350 °C, l'olivine se transforme en serpentine



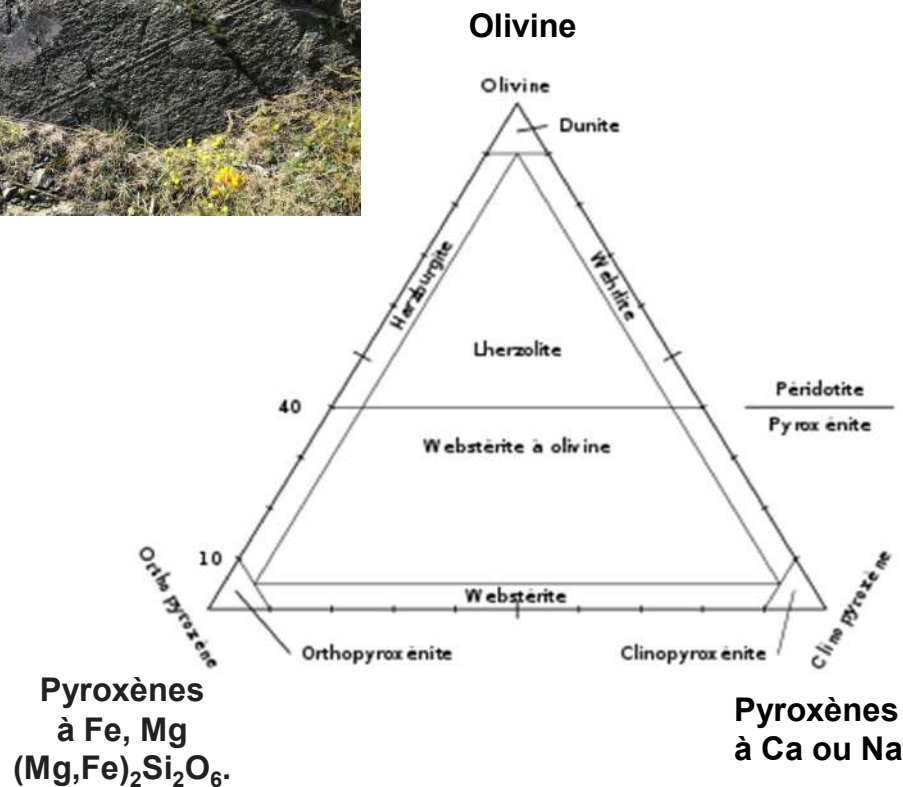
Avec chute de densité (3,3 à 2,6) et augmentation volume de 40 %, 1g d'H₂/Kg de péridot

mais une péridotite complète (olivine et pyroxène) en présence d'eau et de CO₂ peut aussi générer des carbonates (calcite CaCO₃ et magnésite MgCO₃) ou **ophicalcites** :



L'altération des péridotites (et plus largement des silicates basiques) est donc **une manière majeure de générer de l'H₂ et/ou de capturer du CO₂** sur Terre. Cependant, la réaction peut aussi former du méthane (abiotique) selon la réaction de Sabatier : $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

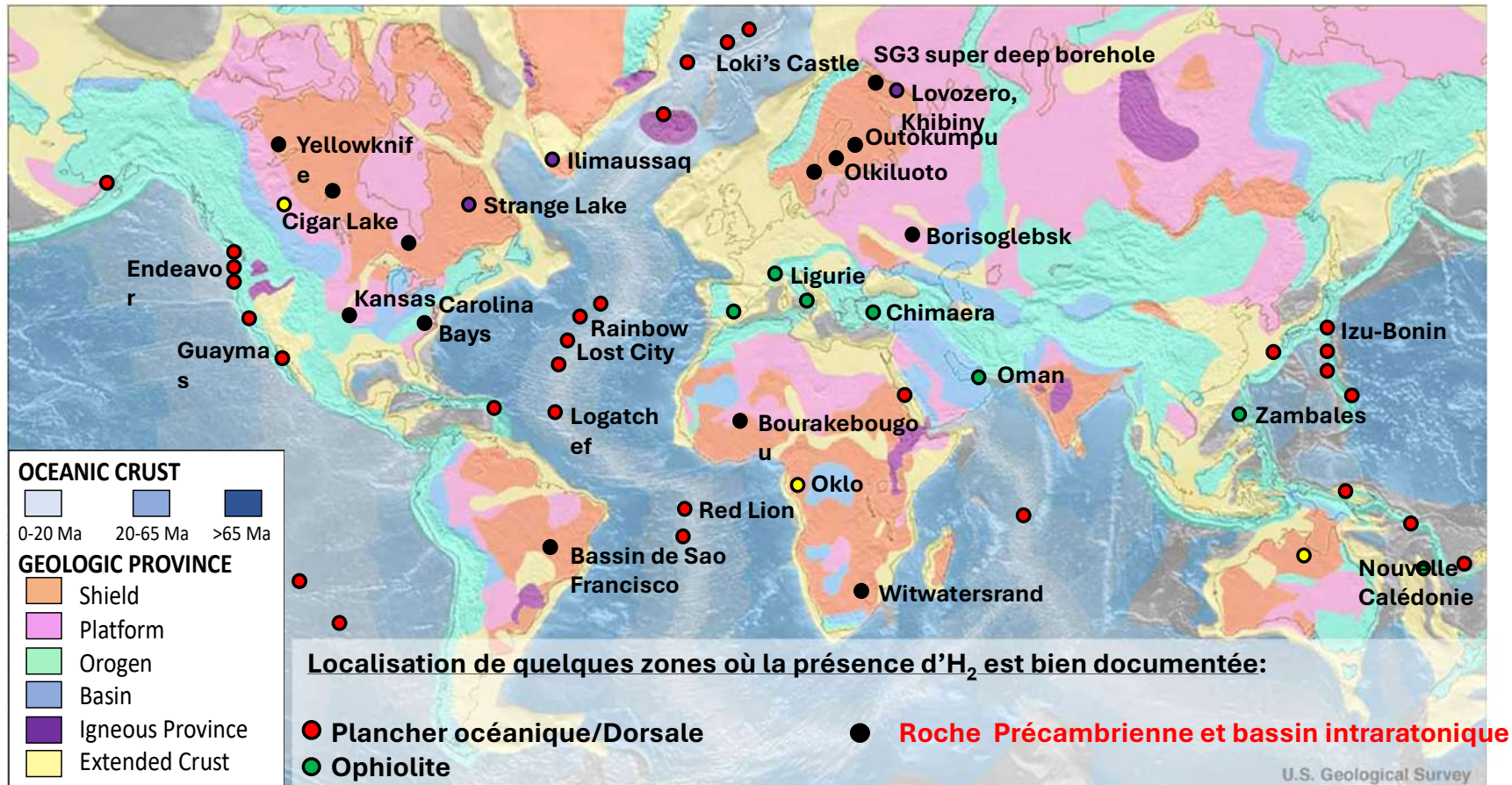
Les péridotites : les roches du manteau



Principales roches du manteau supérieur, ultramafiques (ou ultrabasiques), de structure grenue, les péridotites sont principalement constituées d'olivine associée à d'autres silicates ferro-magnésiens, essentiellement des pyroxènes. Elles doivent leur nom aux péridots, les cristaux d'olivine qui les constituent majoritairement et leur confèrent souvent par altération une teinte verte ou jaune-verdâtre (saines, elles sont extrêmement foncées : holomélanocrates) des grenats, des spinelles (chromite), des plagioclases, des amphiboles, sans quartz,

Par oxydation elles sont à l'origine des minerais de Nickel (Nlle Calédonie/Indonésie), de cobalt ou de chrome,

Les occurrences naturelles d'H₂ : les péridotites mais aussi Les roches précambriennes/paléozoïques riches en Fer!

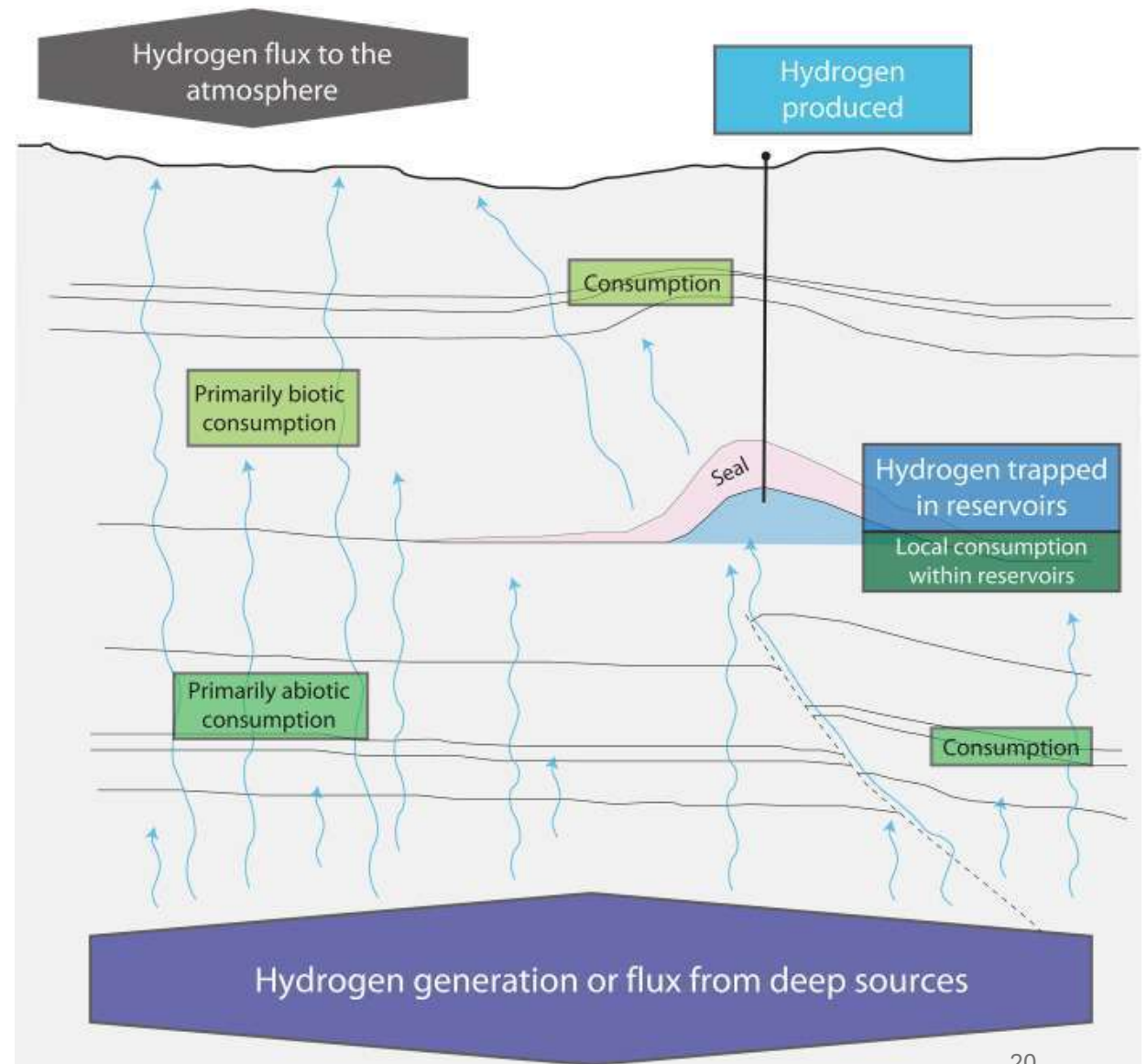


Un seul champ producteur (1300 m³/j) d'H₂ (98 %) au Mali dans un contexte de bouclier précambrien Bourakebougou

Le système Hydrogène naturel : des sources aux émanations en passant par des pièges ?

Le système Hydrogène naturel
De la source (voir diapos précédentes) au piégeage ou à l'échappement à travers migrations et pertes : gaz éminemment volatil et très facilement dissous dans l'eau

*D'après « Model predictions of global geologic hydrogen resources »
Geoffrey S Ellis and Sarah E Gelman -2024*



De l'hydrogène natif en France ?

- **Champs de gaz de Vaux en Bugey, 6% d'hydrogène (Deronzier *et al.*, 2020)**
- Buis les Baronnies, 5% d'hydrogène (Gal *et al.*, 2019)
- Les Tiogaux, (Drome) 14% d'hydrogène (Blavoux and Dazy, 1990)
- Mines de potasse de Wittelsheim, >50% d'hydrogène (Zgonnik, 2020)
- Cotentin, >1000ppm (Prinzhofer, communication personnelle)
- Bordures du fossé bressan > 1500 ppm (Rigollet et Pélissier, 2020)
- **Pyrénées occidentales > 1000ppm (Lefeuvre *et al.*, 2021)**

Le champ de Vaux en Bugey

Découvert en 1906 forage pour sel : éruption de gaz pendant 3 mois !

À 216 m/Nm dans une lentille dolomitique du Keuper salifère, 22 Gm3 GIP

Composition :

CH₄ : 80 %

H₂ : 5 %

N₂ : 5% azote

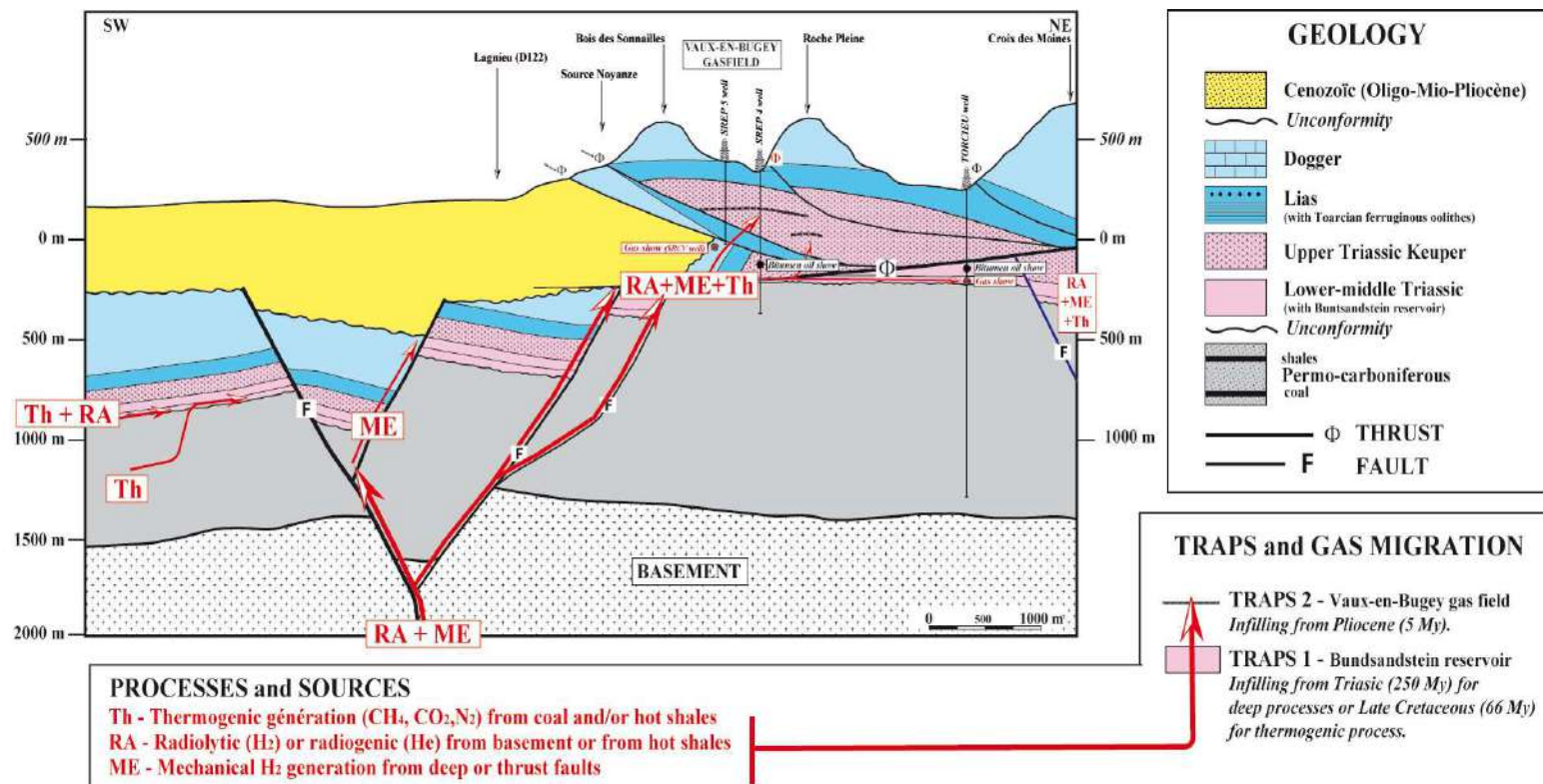
C₂H₄ : 5%

C₃H₆ : 3%

CO₂ : 2%

He : 0,1%

Production de 1924 à 1961



Plan de la présentation

L'hydrogène pourquoi faire ? Utilisations actuelles et ...futures

L'hydrogène: caractéristiques physico-chimiques

Les différentes couleurs de l'hydrogène et leurs plus et moins

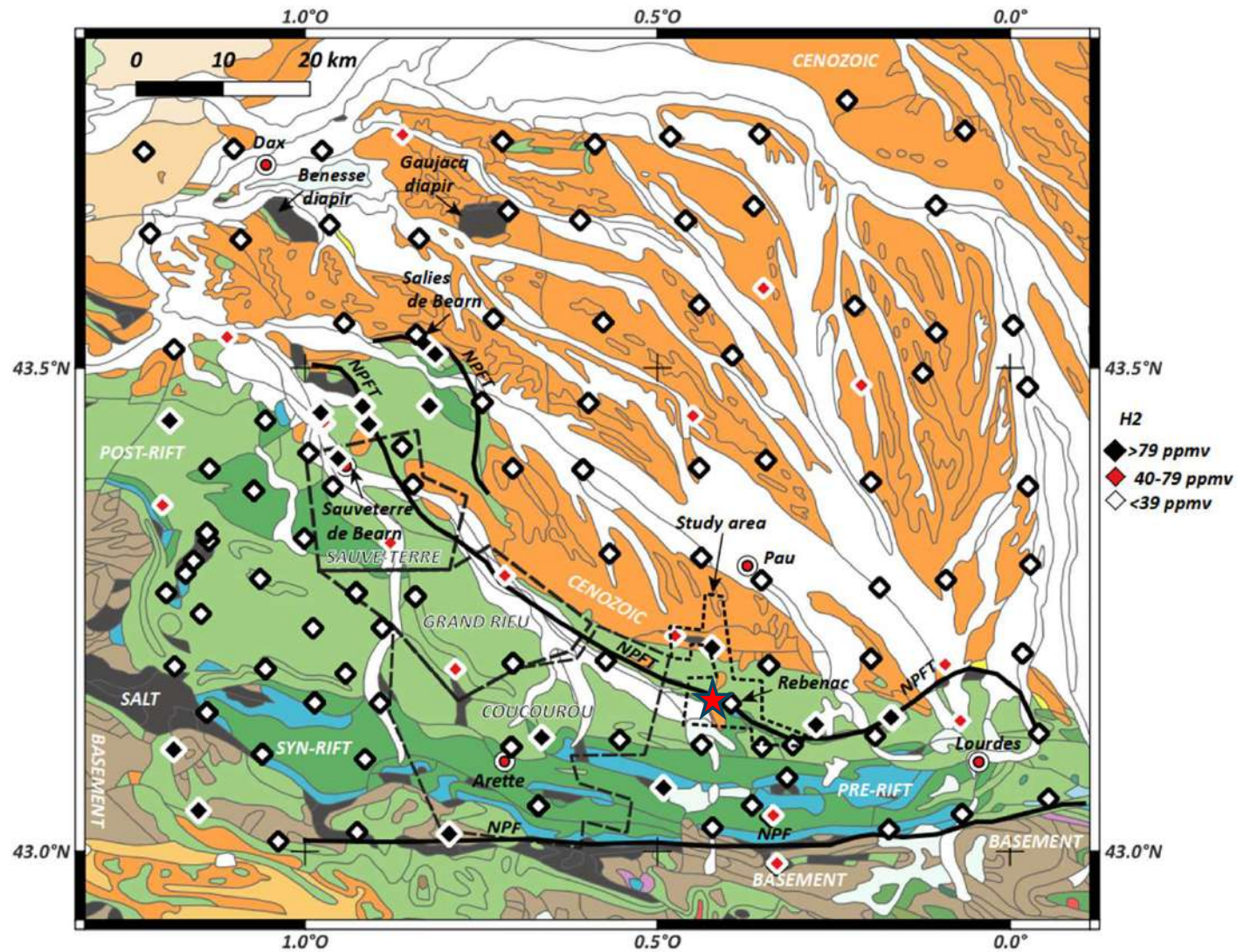
L'hydrogène naturel : les occurrences géologiques

Le système hydrogène naturel : de la génération au piégeage ou la perte

L'exploration : exemple du Sud-Ouest de la France

Conclusions : l'hydrogène naturel : tout reste à prouver !

Emanations d'H₂ dans la bordure nord du bassin de Mauléon



Data from Lefeuvre et al. (2021, 2022) in Aubourg C. and Blaizot, M. (2025)-EAGE TOULOUSE Field trip-

Les permis H2 dans le Sud-Ouest, depuis 2022 la France a reconnu dans le code minier l'hydrogène natif comme une ressource

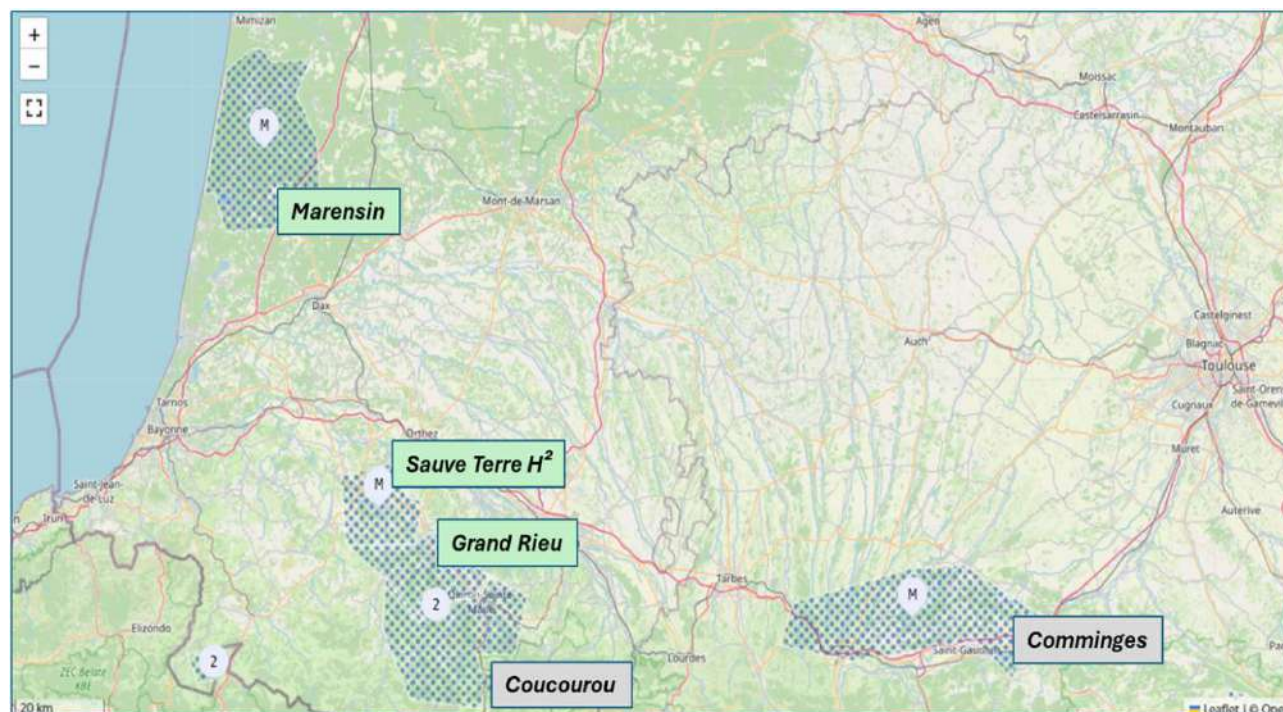
« Sauve Terre H2 » (Béarn ; Terrensis), *validé*

« Grand Rieu » (Béarn ; 45-8 Energy - Storengy), *validé*

« Marensin » (Landes ; Storengy – 45-8 Energy), *validé*

« Coucourou » (Béarn ; Terrensis), *en cours d'instruction*

« Comminges » (Htes-Pyrénées, Hte-Garonne ; Mantle 8), *en cours d'instruction*



Puits profond de Contis 1 (Landes)

Stratigraphie :

Tertiaire : 0-2144 m

Crétacé Sup: 2144-2441 m

Trias salifère : 2441-3630 m

Trias dolomitique: 3630-3665 m

Trias gréseux : 3665-4116 m

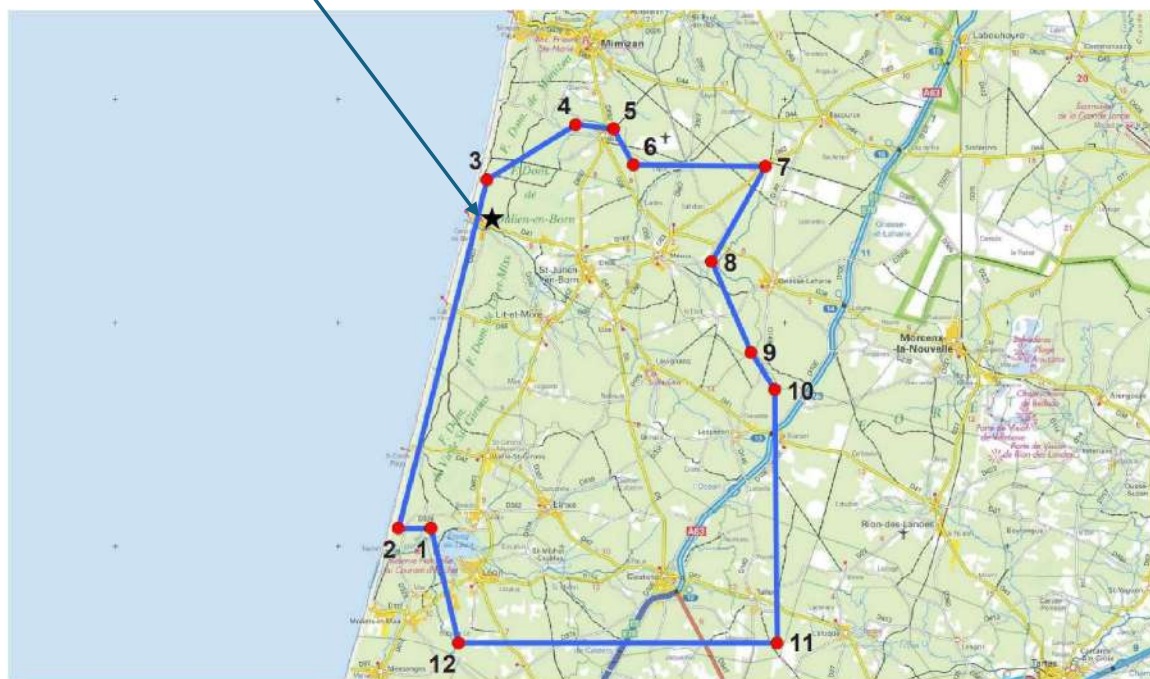
Dévonien Dolomitique fissuré: 4116-4806 m (TD)

Indices :

4160 à 4270 m: N₂: 26%; CO₂: 59 %; **H₂: 7%** ;
CH₄ : 6%, He : 0,7 %

4450 à 4806 m: N₂: 86 % , **H₂: 13%** et He :
0,2%

Tests : Production 24 m³/j d'eau très salée
(100 à **300 g/l**) avec gaz dissous,



D'après BRG-Infoterre-BSS

De nombreux massifs de lherzolites dans les Pyrénées...

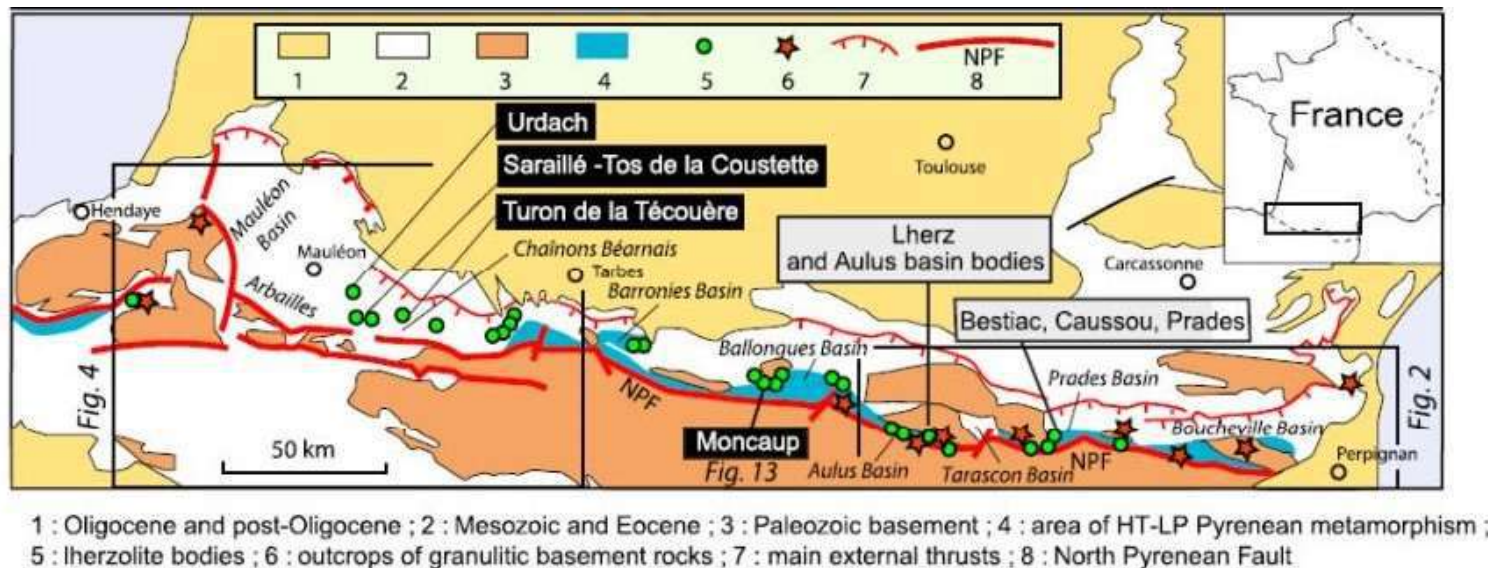


Figure 1. Simplified map of the Pyrenean belt with the location of the main ultramafic bodies and outcrops of lower crust. S type (sedimented) and T type (tectonic) lherzolites are distinguished on the basis of their geological setting as discussed in text. The main mid-Cretaceous basins are shown in italic. Location of Figures 2, 4, and 13 is indicated.

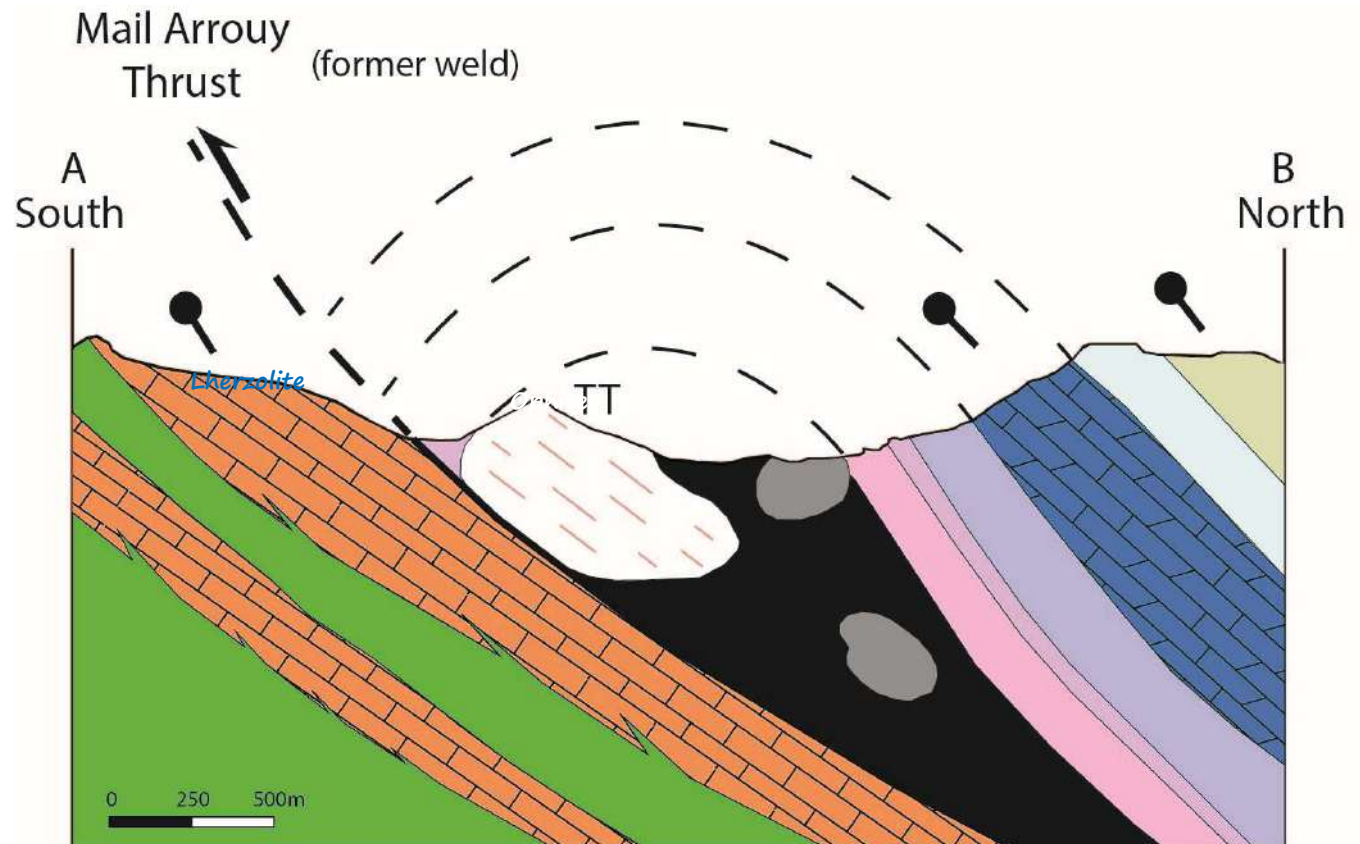
Contexte géologique des péridotites (Lherzolites) dans les Pyrénées

Lherzolites (comme les ophites) très souvent associées à des diapirs ou sutures salifères triasiques,

Le Turon de la Técoière (TT) est une enclave de lherzolite+/- serpentinisée et mylonitisée avec des grenats (profondeur initiale de ~70 km ?)

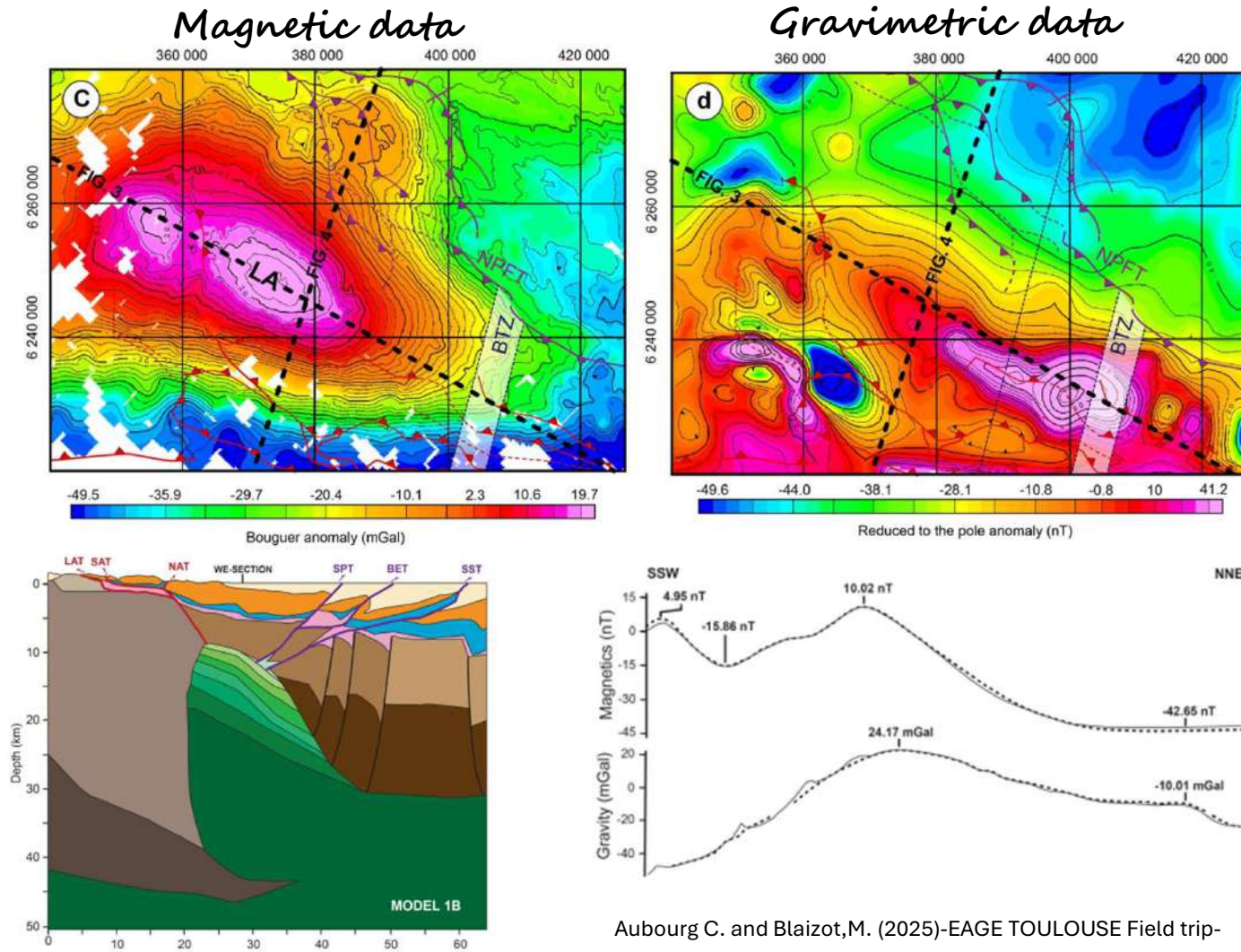
Son soulèvement est lié à l'hyperextension du Crétacé Sup,

Ce nombreuses émanations H2 sont détectées le long du chevauchement du Mail Arrouy.



D'après Loiseau et al, (2023) in EAGE TOULOUSE 2025
Aubourg & Blaizot field trip

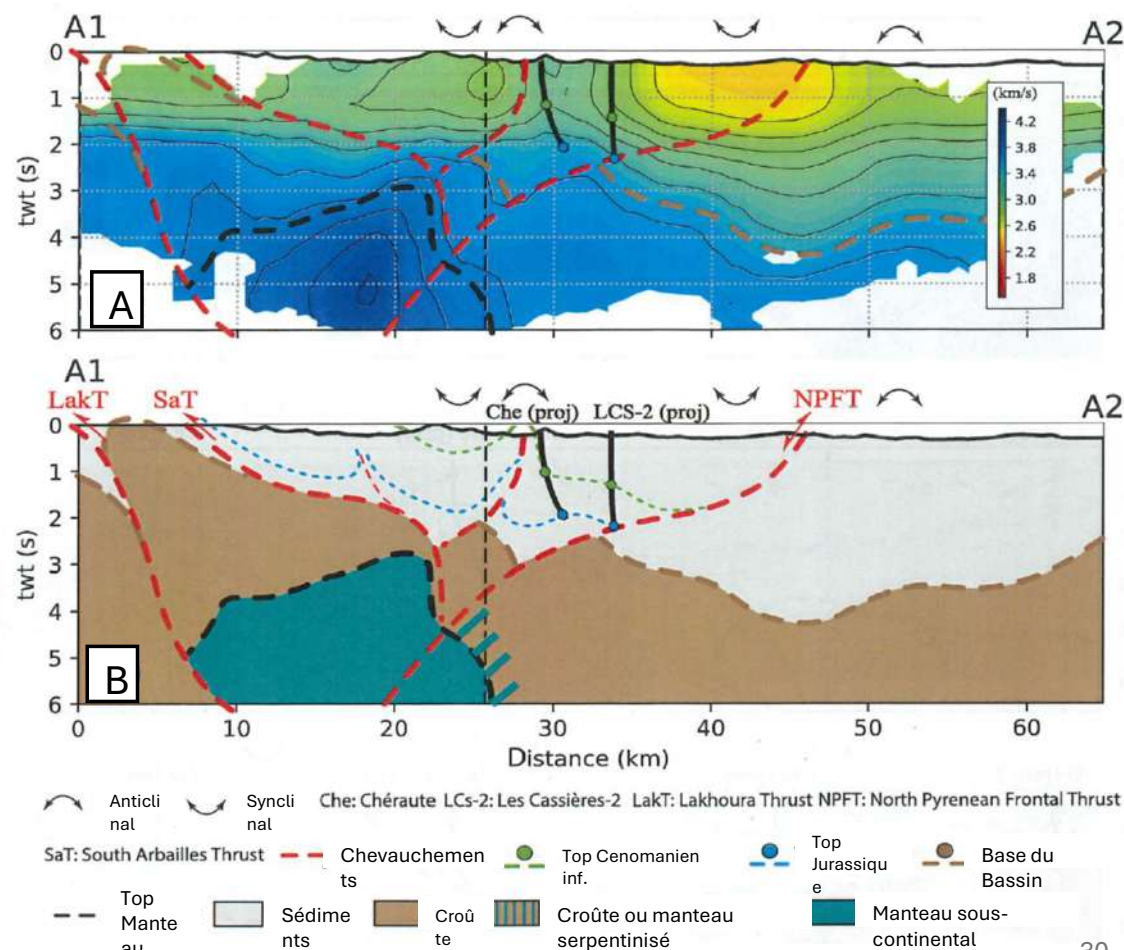
Le bassin de Mauléon : des péridotites proches, beaucoup d'eau, une belle pincée de sel: la bonne recette pour stocker l'H2 ?



Aubourg C. and Blaizot, M. (2025)-EAGE TOULOUSE Field trip-

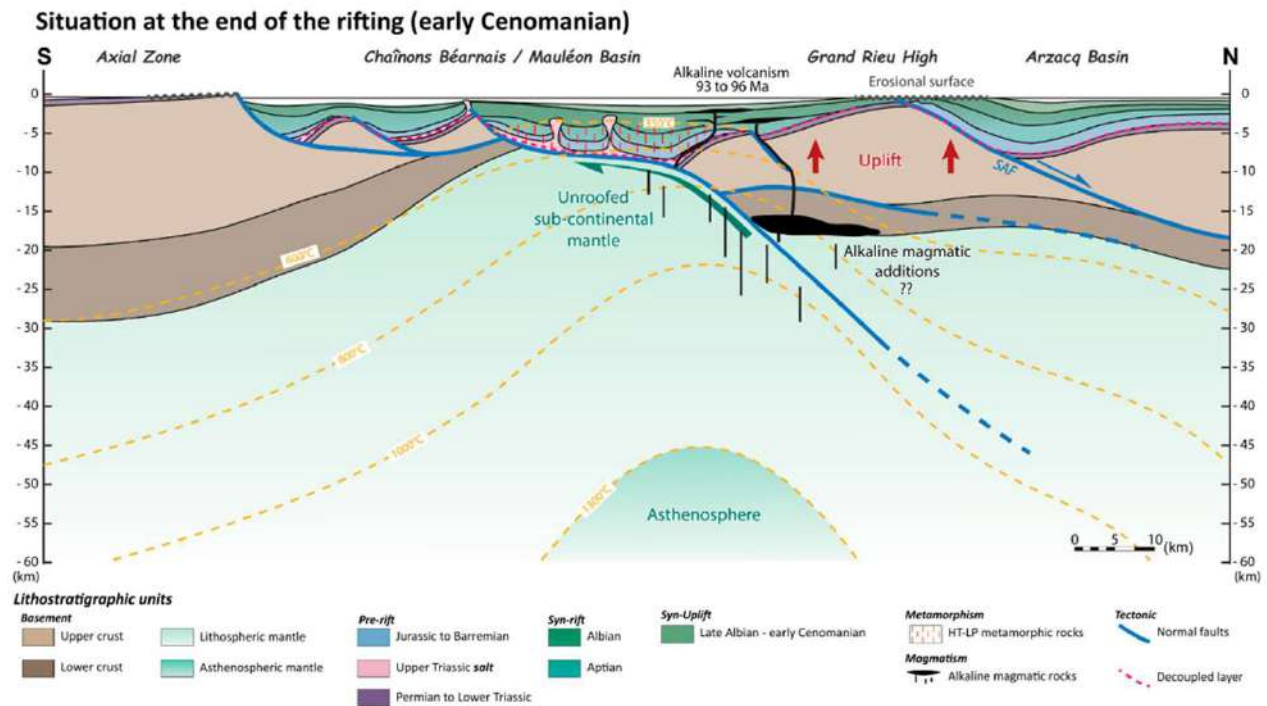
De l'H₂ natif dans les Pyrénées ?

Profil sismique SW-NE de l'Est du bassin de Mauléon montrant (A) un modèle de vitesse et (B) l'interprétation géologique de ce modèle intégrant les données de surface et des puits de Chéraute et Les Cassières-2, d'après Lehujeur *et al.* (2021)



Mise en place des péridotites à l'Albo-Cénomaniien

Contexte
d'hyperextension
crustale avec exhumation
du manteau à l'Albo-
cenomanien
Associé à un
metamorphisme HT-BP
entre 300 et 450 °C



Ducoux et al., (GSA, 2021)

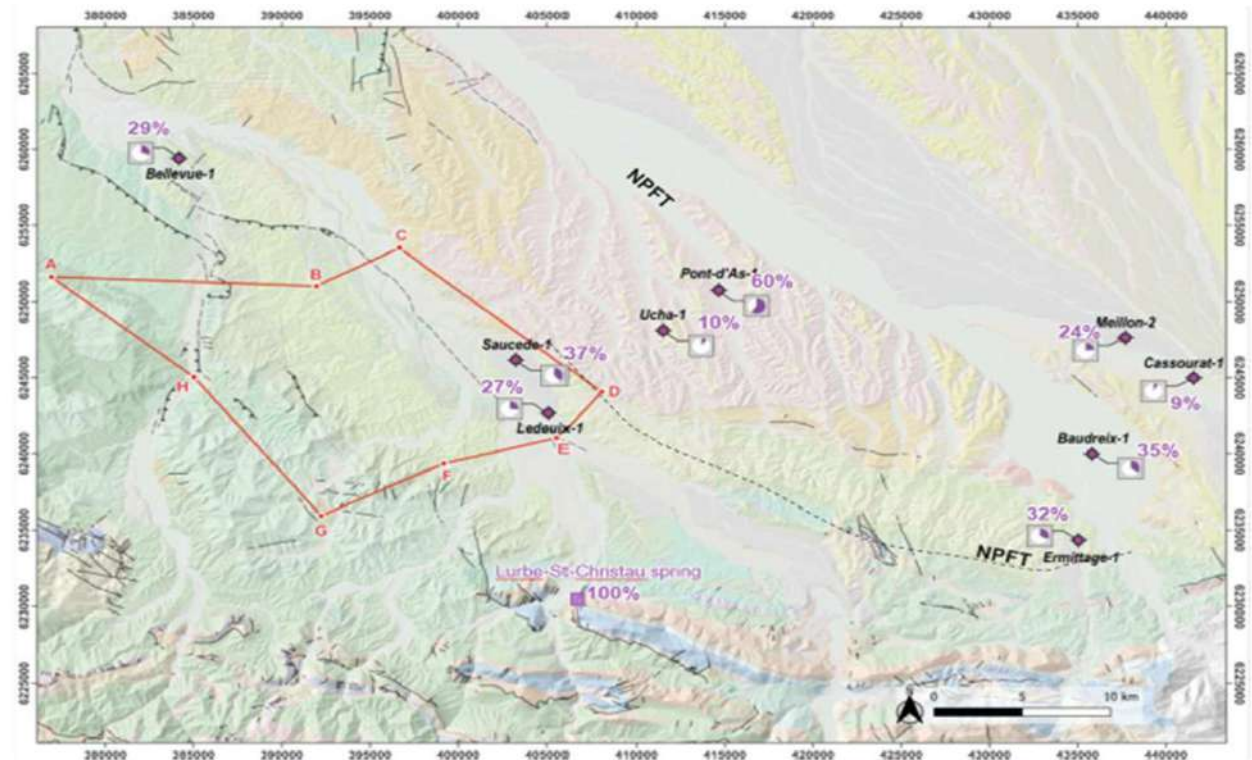
Plusieurs gisements de gaz du bassin sud de l'Aquitaine ont montré la présence de méthane abiotique révélé par des données isotopiques. La source du CH₄ n'est pas seulement les marnes classiques du Jurassique, mais peut-être un CH₄ provenant de la combinaison de

$$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$

Le H₂ pourrait venir de l'altération des péridotites

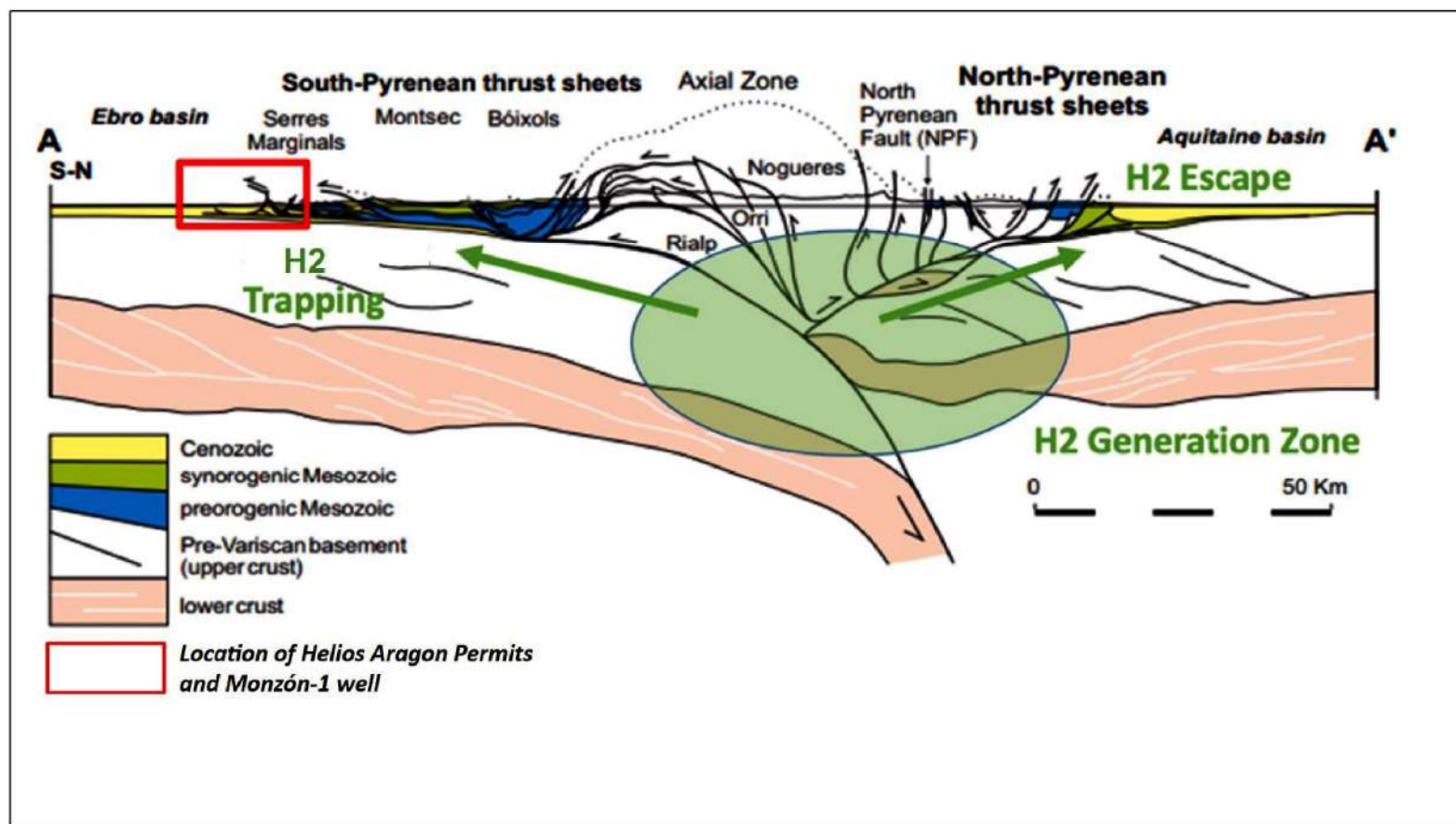
*D'après Aubourg C. and Blaizot M. (2025)-
EAGE TOULOUSE Field trip-*

Des données de laboratoires nouvelles : présence de méthane abiotique dans le piedmont béarnais

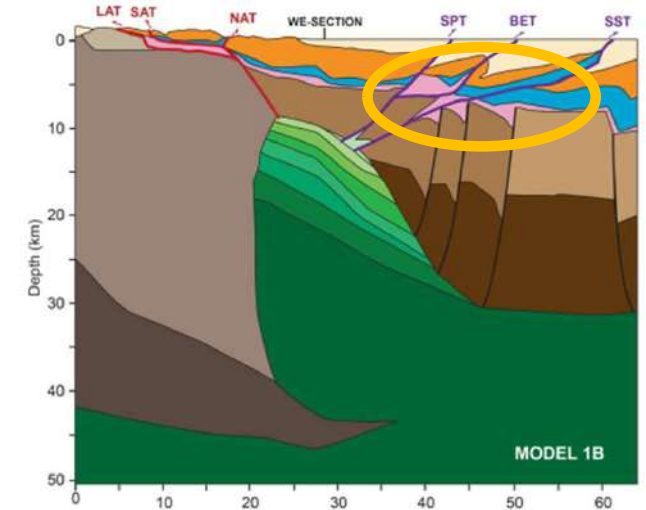
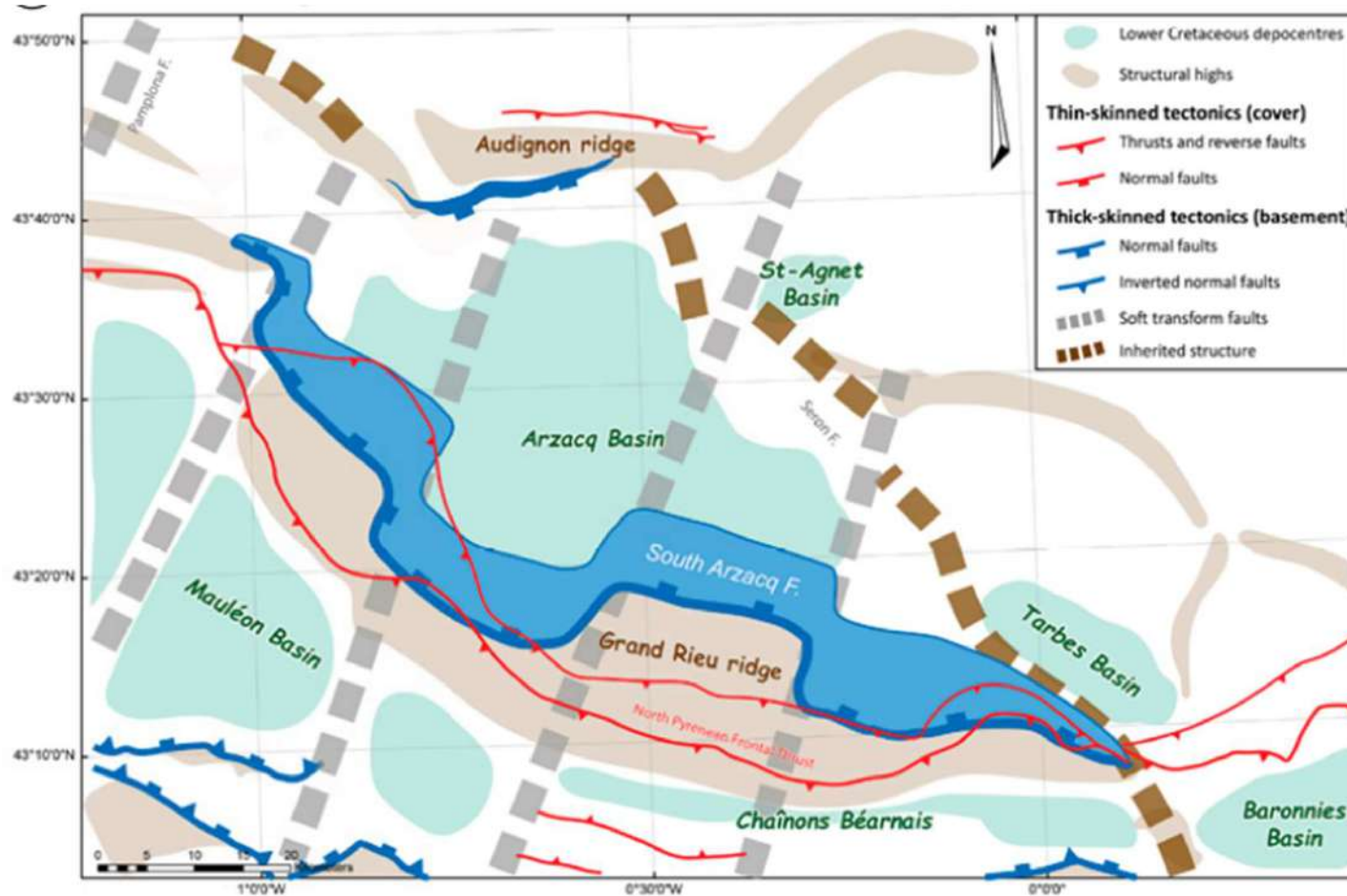


De l'H₂ dans les Pyrénées ? En Espagne aussi ?

La recherche en Espagne réalisée par la société Helios se dirige vers les séries Trias où le sel Keuper pourrait fournir une couverture aux gisements potentiels



L'objectif en France : H2 sous sel triasique ?



Conclusions : prospecter et trouver de l'H₂ blanc ?

Chercheurs et industriels recherchent aujourd'hui de l'H₂ natif mais il reste de nombreux verrous scientifiques pour **préciser le système H, surtout son possible piégeage, en sous-sol.**

R&D fondamentale : l'origine de l'H₂ naturel, la caractérisation et la quantification des flux, le transport de l'hydrogène et son piégeage. R&D appliquée : les moyens d'identification géophysiques, sur les capteurs géochimiques et l'élaboration de guides d'exploration (Académie des Technologies-2024),

Les chercheurs français sont parmi les leaders de cette recherche. A la demande du CNRS , **le premier congrès mondial sur l'H₂ natif a eu lieu en 2021 à Paris.** En France, sous l'impulsion d'AVENIA, des entités publiques et privées regroupées dans le consortium EarthH₂ évaluent la ressource en hydrogène naturel dans les territoires.

Le Conseil Régional de **Nouvelle Aquitaine** a décidé fin 2021 **le lancement du projet H₂NA**, destiné à caractériser le [ou les] système[s] hydrogène de la région, évaluer les concentrations et les flux, et **localiser les possibles accumulations**, **Enfin l'H₂ naturel a été ajouté au Code Minier français dans une ordonnance parue au JORF mi-avril 2022. Cinq permis ont été demandés ou attribués depuis dans le Sud-Ouest, territoire prometteur,**

L' H₂ naturel est peut-être une ressource d'avenir. Produit en quantité dans de nombreux contextes géologiques, il peut migrer jusqu'à la surface. **Mais peut-il s'accumuler et où ?**

That's the question

Quelques références...

Académie des Technologies (2024)- Accélérer la caractérisation de la ressource et l'exploration de l'H₂ naturel en France

Aubourg C. and Blaizot, M. (2025)-EAGE TOULOUSE Field trip-

<https://www.geolval.fr/images/Geoval/actualites/2025/06-juin/Field%20trip%20EAGE%201-2%20June%202025%20Aubourg%20Blaizot.pdf>

Blaizot, M. et Masse, P. (2022)- Voir sous la croûte terrestre: Les lherzolites-Contexte géologique et application à la recherche d'H₂ natif.-

https://geolval.fr/images/Geoval/Sorties/2022/Sortie_JNG/Confrence-Oloron.pdf

Ducoux M. (2021)- Basement-decoupled hyperextension rifting: The tectono-stratigraphic record of the salt-rich Pyrenean necking zone (Arzacq Basin, SW France). *GSA Bulletin* (2022) 134 (3-4): 941–964. <https://doi.org/10.1130/B35974.1>

Ellis Geoffrey and Gelman Sarah (2024) Model predictions of global geologic hydrogen resources, *SCIENCES ADVANCES*: Vol 10, Issue 50, DOI: [10.1126/sciadv.ado0955](https://doi.org/10.1126/sciadv.ado0955)

Everts Arnout (2025)-Estimates of trapped hydrogen globally – a reality check- GeoExpro Magazine

Lefevre. N. et al., (2021)- Natural hydrogen migration along thrust faults in foothill basins: The North Pyrenean Frontal Thrust case study. *Applied Geochemistry-Volume 145*, October 2022, 105396 <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105396>

Prinzhofer A, et Deville E. -2015- H₂ naturel : La prochaine révolution énergétique- Belin Editions-

Ross, C. M., Vega, B., Frouté, L., Kim, T.-W., & Kovscek, A. R. (2025). Hydrogen generation and serpentinization of olivine under flow conditions. *Geophysical Research Letters*, 52; <https://doi.org/10.1029/>

Saspiturry, N., Allanic, C., & Peyrefitte, A. (2024). Serpentinization and magmatic distribution in a hyperextended rift suture: Implication for natural hydrogen exploration (Mauleon basin, Pyrenees). *Tectonics*, 43,

SGF - Géologues n° 213 (2022) -L'hydrogène et les gaz rares ,numéro coordonné par Marc Blaizot et Jean-Marc Fleury-

Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>