GéolVal

HAUT BÉARN

Journées Nationales de la Géologie

« Voir sous la croûte terrestre » : les lherzolites
Contexte géologique
Application à la recherche d'H_2 natif

Marc Blaizot et Pierre Masse

Association Geolval

Oloron-Sainte-Marie, le 21 Mai 2022

GéolVal

HAUT BÉARN

«Voir» sous la croûte terrestre : les lherzolites
Contexte géologique et exploration de l'hydrogène

- La structure de la Terre
- La croûte terrestre et le manteau
- Les roches plutoniques/ignées de ces ensembles et leurs altérations
- Une altération particulière: l'hydrolyse des péridotites-lherzolites
- Hydrogène : types et utilisations d'aujourd'hui et demain
- Le système Hydrogène blanc et son exploration
- Applications aux Pyrénées occidentales
- Conclusions

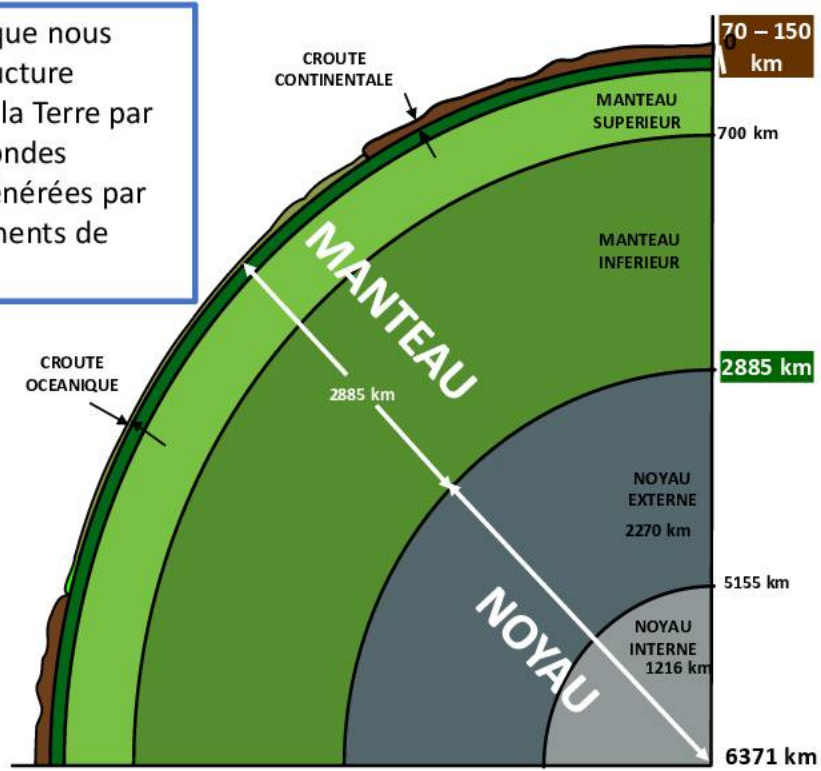
4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

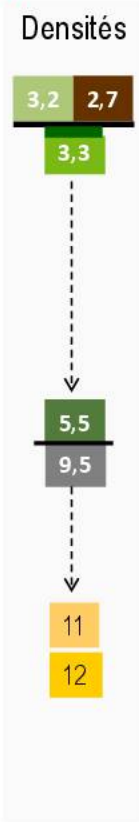
La Terre, une planète solide constituée d'enveloppes

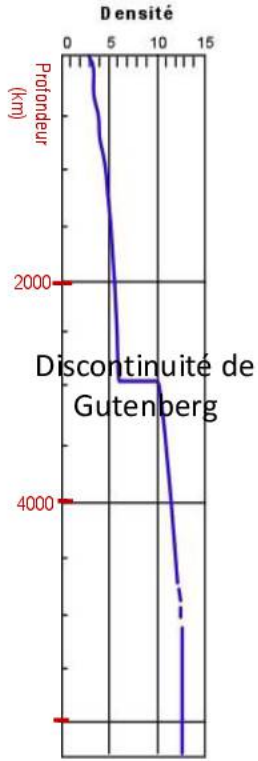
GéolVal

HAUT BÉARN

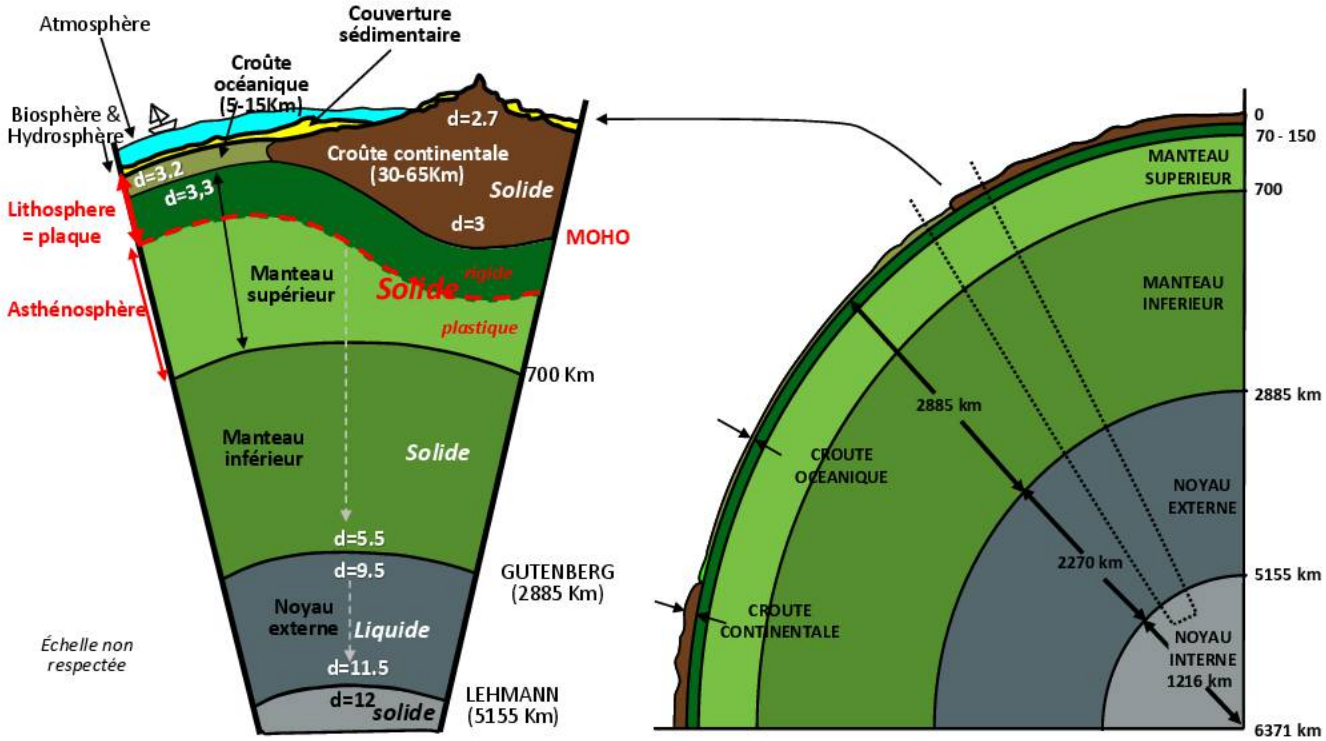
La géophysique nous révèle la structure probable de la Terre par l'étude des ondes sismiques générées par les tremblements de Terre







Les croûtes océaniques et continentales



4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

4ème édition
JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE
Du 20 au 22 MAI 2022

Comment « voir » le manteau ?

À travers 2 grands types de rifting ou déchirure continentale:

a - actif ou volcanique

b- passif ou mantellique

Les étapes du rifting de bas en haut

0 - état initial de la croute continentale

1 - déformation diffuse avec nombreuses failles

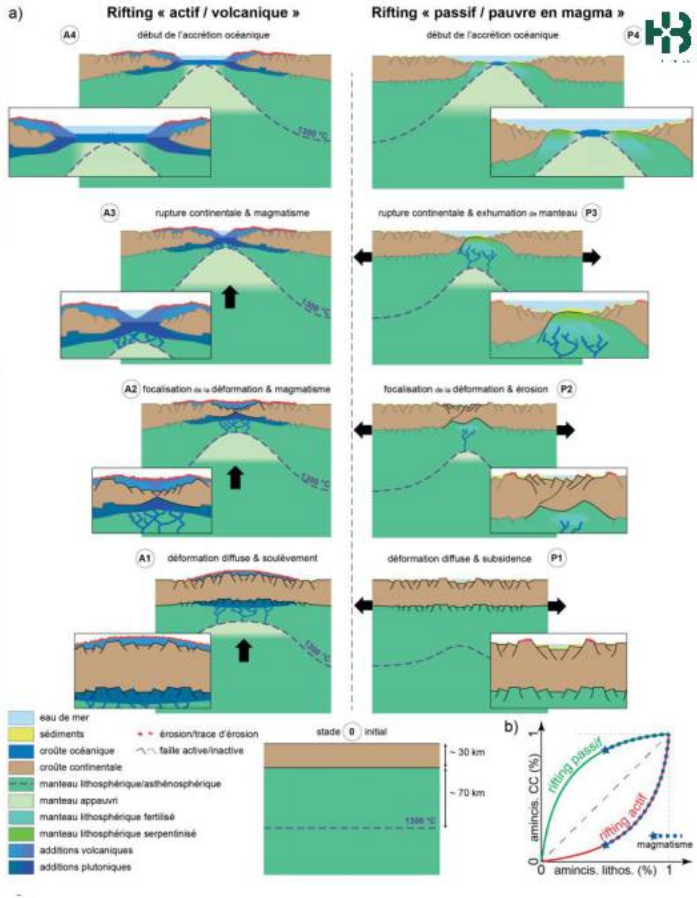
2 - focalisation sur quelques failles majeures permettant l'amincissement de la croute

3 - rupture continentale

4 - developpemnt de la croute océanique

Evolution temporelle de l'amincissement crustal : beaucoup plus rapide en rifting passif

Evolution temporelle du transfert de chaleur : beaucoup plus rapide en rifting actif



4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

Deux grands types d'ouverture océanique

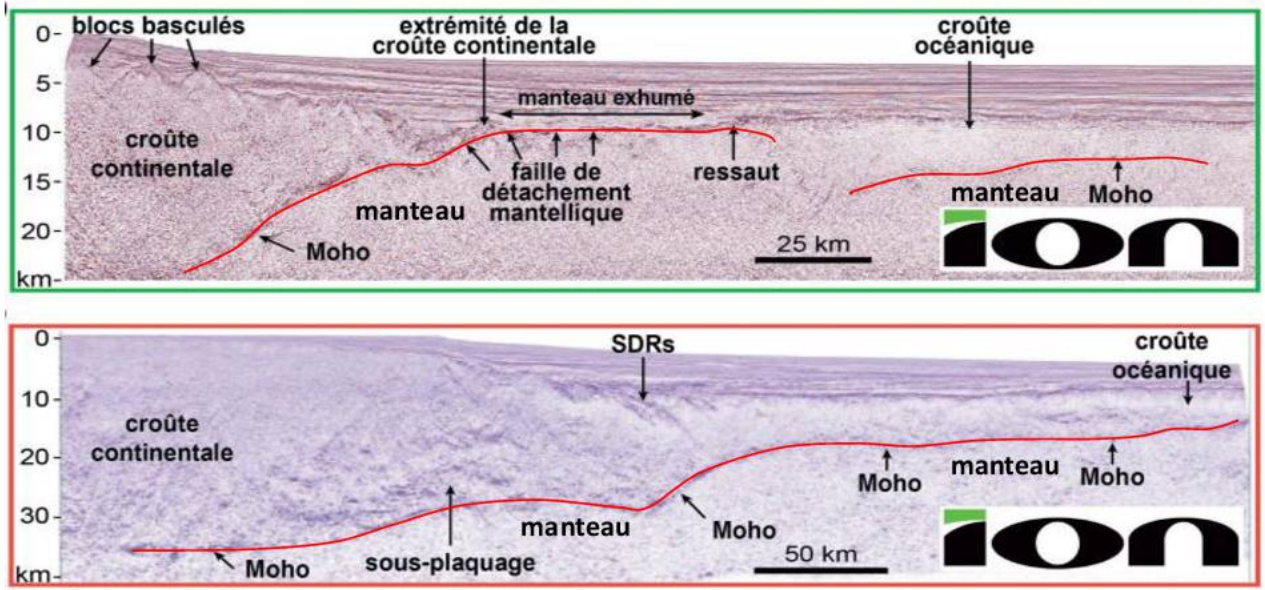
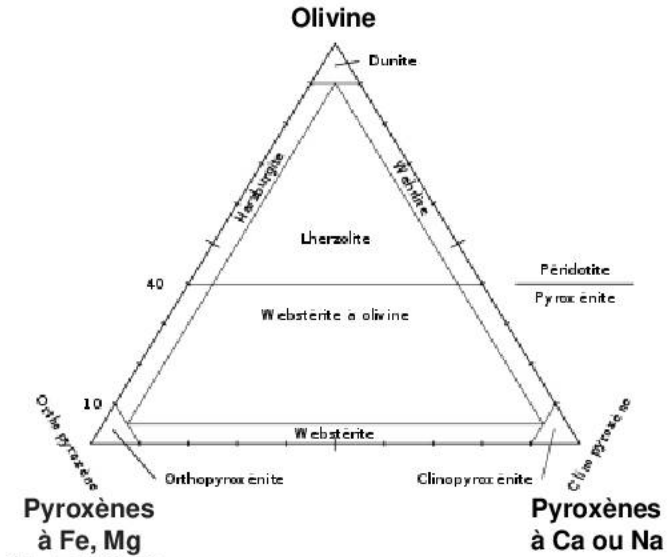


Fig. 5. – (a) Morphologie des marges passives en fonction de la chronologie entre extension mécanique et activité magmatique d'une part, et du budget magmatique d'autre part (modifié d'après Tomasi, 2020). (b) Coupe sismique de la marge passive sud-est indienne (modifiée d'après Haupert *et al.*, 2016). Cette marge est décrite comme pauvre en magma, à l'instar des anciennes marges de la Téthys alpine. (c) Coupe sismique de la marge volcanique brésilienne (modifiée d'après Reuber *et al.*, 2019). SDRs : Seaward Dipping Reflectors (*cf.* paragraphe 3d pour la définition de SDRs et de sous-plaquage).

4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

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 extrèmement 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,

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 à 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

$$\mathbf{6[(Mg_{1.5}Fe_{0.5})SiO_4]_{(olivine)} + 7H_2O = 3[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]_{(serpentine)} + Fe_3O_{4(magnétite)} + H_2}$$

Avec Chute de densité (3,3 à 2,6) et augmentation volume de 40 % 1g d'H2/Kg de péridot, 250 à 350 °C

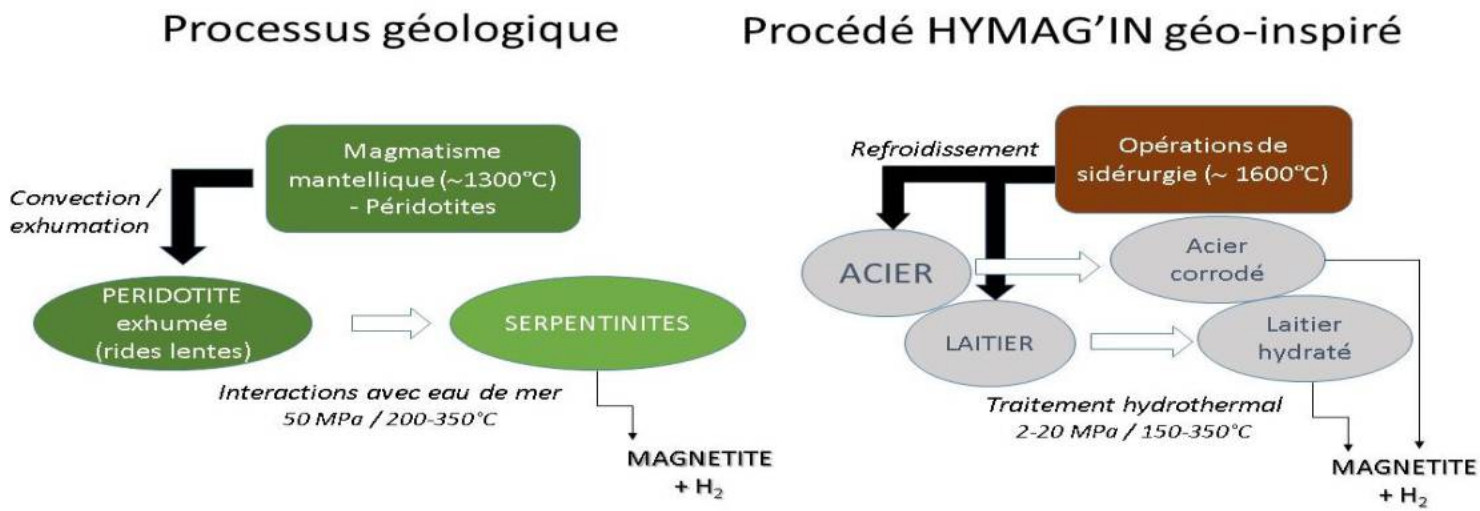
mais une péridotite complète (olivine et pyroxène) en présence d'eau et de CO_2 peut aussi générer des carbonates (calcite et magnésite ou **ophicalcites** :

$$\mathbf{Mg\,SiO_{4(olivine)} + CaMgSiO_{6(pyroxène)} + 2CO_2 + 2H_2O = [Mg_3Si_2O_5(OH)_4]_{(serpentine)} + CaCO_3 + MgCO_3}$$

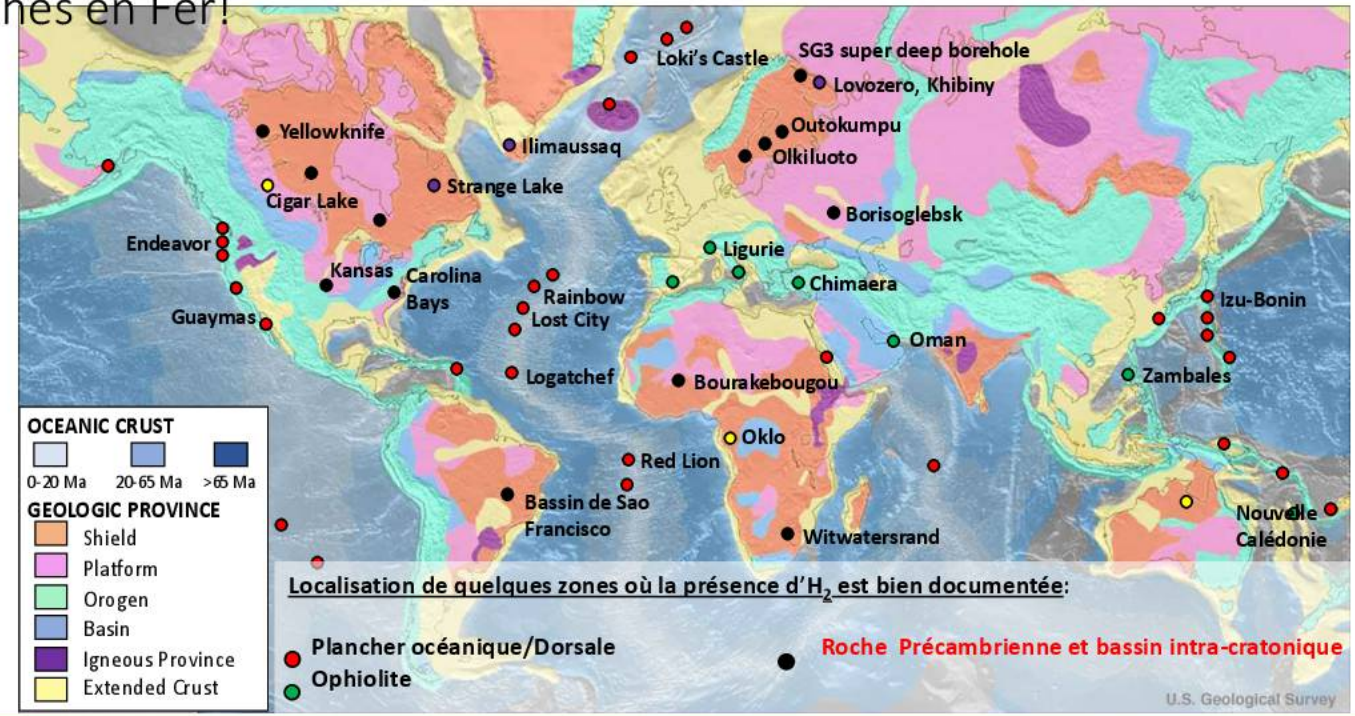
L'altération des péridotites (et plus largement des silicates basiques) est donc **une manière majeure de générer de l'H_2 et de capturer du CO_2** sur Terre. Cependant, la réaction peut former du méthane (abiotique) selon la réaction de Sabatier : $\mathbf{2H_2 + CO_2 \Leftrightarrow CH_4 + O_2}$

Exemples d’altération de lherzolithe

Un processus naturel reproduit en laboratoire et déjà copié dans l'industrie : la start-up HYMAG'IN à Grenoble



Les occurrences naturelles d'H_2 : pas seulement liées aux péridotites mais aussi aux roches précambriennes / paléozoïques riches en Fer!



Un seul champ producteur (1300 m3/j) d'H_2 (98 %) au Mali dans un contexte de bouclier précambrien ….
Bourakebougou

4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

GéolVal

HAUT BÉARN

GÉNÉRATION

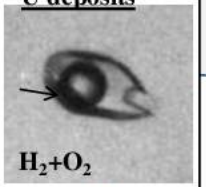
Dégazage magmatique

Processus mécaniques sur jeux de failles

Altération hydrothermale des minéraux Fe^{2+} serpentinisation

Radiolyse de l'eau

U deposits



Matière organique

Depuis CH4 ou NH3

Bactéries

Fluides riches en H_2 dans la croûte et le manteau supérieur

RÉACTIVITÉ

Adsorption /occlusion

Réduction des minéraux oxydés

$3Hem + H_2 \rightarrow 2Mt + H_2O$

Réduction des sulfates et des carbonates

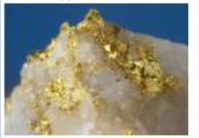
$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

$SO_4^{2-} + 4H_2 + 2H^+ \rightarrow H_2S + 4H_2O$

Consommation par les bactéries

Formation des gisements

$AuCl_{2\,(aq)}^- + 0.5H_2 \rightarrow Au_{(s)} + 2Cl^- + H^+$



Échappement dans l'espace

4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

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 m 3/j/km2

Les couleurs de l'hydrogène (H_2)

En fonction des modes d'obtention , l'hydrogène est dit :
Blanc : H_2 naturel ou natif (un seul champ au Mali) n'émet pas de CO2 mais où le chercher ?
Vert : obtenu par l'électricité des EnR et l' électrolyse de l'eau
Jaune : obtenu par l'électricité nucléaire et l' électrolyse de l'eau
Bleu : obtenu par vaporéformage du méthane associé à la séquestration du CO2 émis (CCS)
Gris : par vaporéformage du méthane
Noir : par vaporéformage du charbon $H_20 + CH_4 = H_2 + CO_2$

Aujourd'hui l'hydrogène est obtenu à 98 % par vaporéformage (noir ou gris) ; sa consommation planétaire est d'environ 80 Mt/an / synthèse de l'ammoniac et désulfuration des pétroles lors du raffinage . Extrêmement émetteur de CO_2 ; 11 t CO2 pour 1 t d'H_2
Soit 1 Gt de CO_2 émis mondialement ou 3 % des émissions totales de CO_2 ou 2 fois les émissions totales de la… France !

L' H_2 vert par électrolyse pose la question de la consommation massive d'eau et la consommation énergétique très forte (1 kg d'H2 = 60 Kwh): si on voulait fabriquer 80Mt/an il faudrait 3600TWh la production électrique annuelle de l'Europe : une évidente… chimère

L'hydrogène, quelques rappels

L'atome d'hydrogène, de symbole H, est un des composés principaux de l'eau et de toute la matière organique, très répandu sur Terre mais et dans l'univers.

L'hydrogène (molécule) est un gaz (P et T normales), de formule H_2, **inodore et incolore, non toxique et non polluant**, découvert par Cavendish (1766) et nommé par Lavoisier (1783)

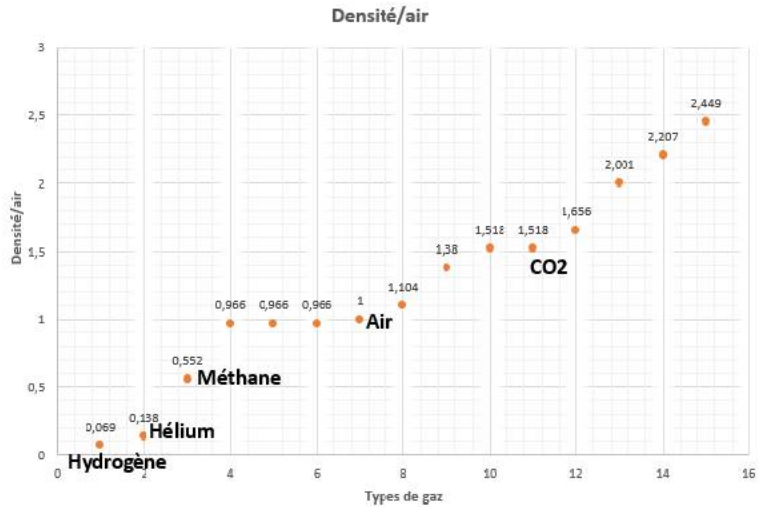
L'**hydrogène est liquide** en dessous de son point de condensation, soit −252,87 °C à pression atmosphérique. Il a alors une masse volumique de 70,973 kg/m³.

Molécule	Pouvoir calorifique en kWh/kg	Pouvoir calorifique en kWh/m3
Hydrogène	39	3,55
Charbon	7 à 10	
Méthane	11	10
Butane	12,6	30

Comme gaz, il a une densité extrêmement faible de 0,069g/l à 0ºC et à 1 atmosphère (air : 1g/l) > TRES LEGER

L'hydrogène est la plus inflammable de toutes les substances connues > DANGER RECONNU DEPUIS LONGTEMPS (cf. l'accident du dirigeable Hindenburg en 1937 après 63 vols transatlantiques)

Comme il s'agit de la plus petite des molécules gazeuses, les risques de fuites sont plus importants qu'avec n'importe quel autre gaz. > MODE DE PIEGEAGE/STOCKAGE



4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

Demain une économie Hydrogène européenne ? Pourquoi ?

Pau

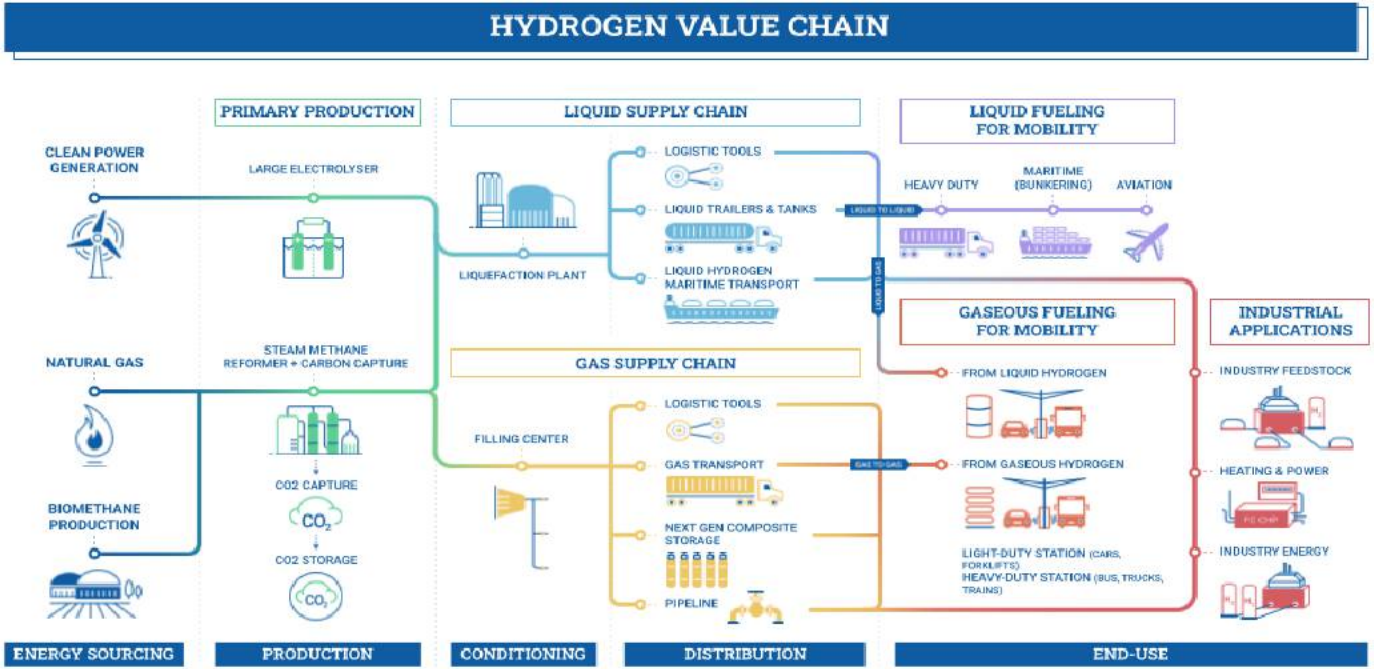
Biarritz

4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

GéolVal

HAUT BÉARN

Demain une économie H_2 européenne ? Comment ? D'après Air Liquide 2021



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)
- **Pyrénées occidentales > 1000ppm (Lefeuvre *et al.*, 2021)**
- Bordures du fossé bressan > 1500 ppm (Rigollet et Pélissier, 2020)

4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

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 :

CH_4 : 80 %

H_2 : 5 %

N_2 : 5% azote

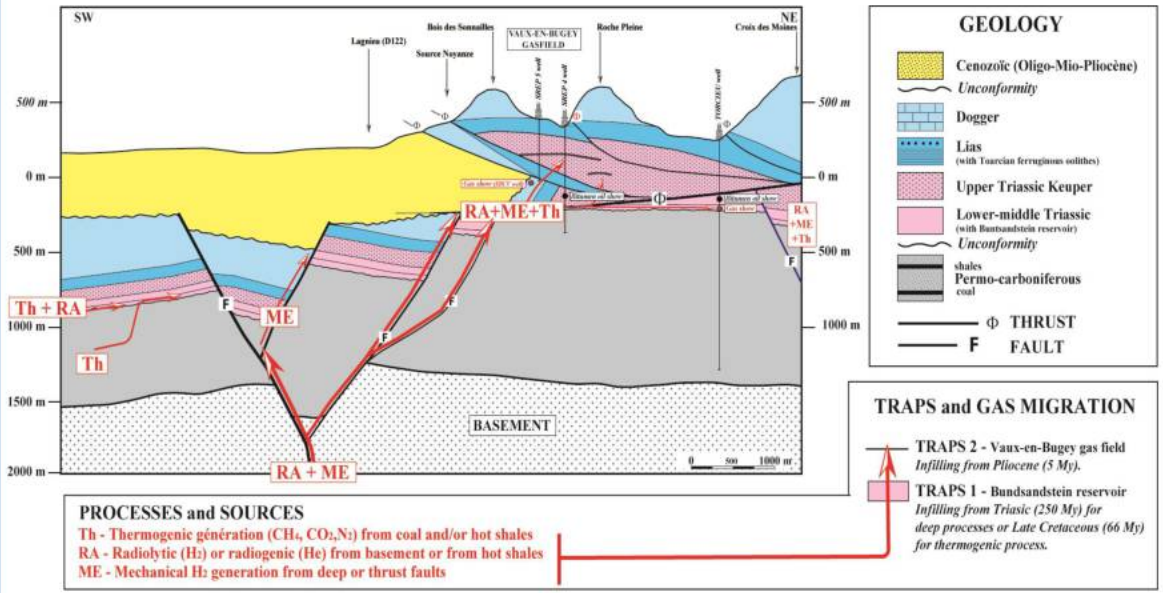
C_2H_4 : 5%

C_3H_6 : 3%

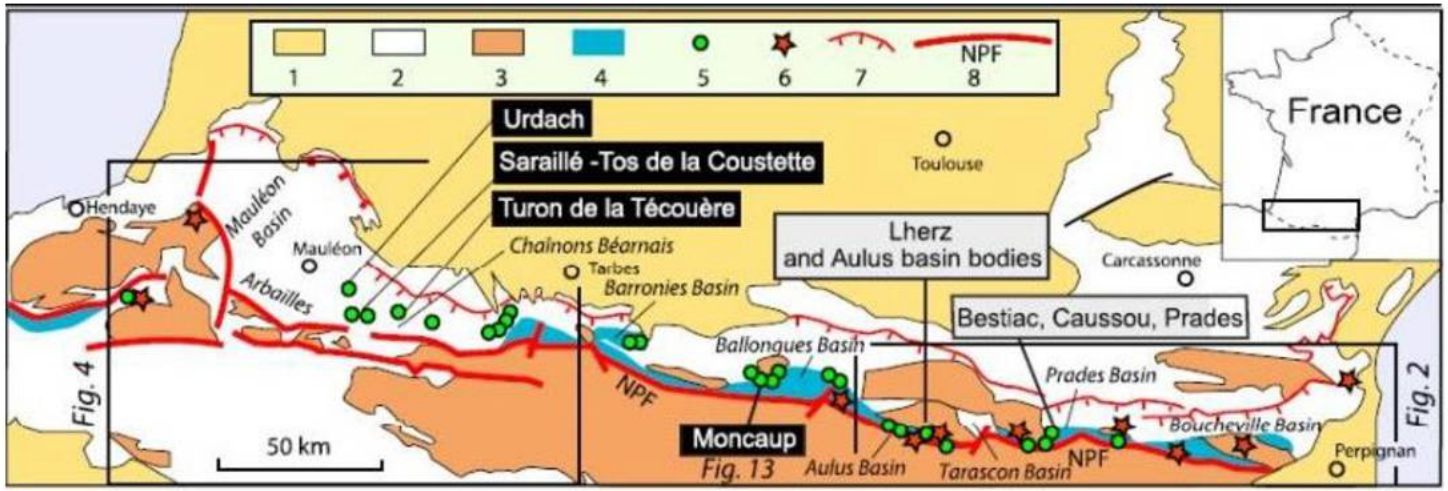
CO_2 : 2%

He : 0,1%

Production de 1924 à 1961



De nombreux massifs de lherzolites dans les Pyrénées…



1 : Oligocene and post-Oligocene ; 2 : Mesozoic and Eocene ; 3 : Paleozoic basement ; 4 : area of HT-LP Pyrenean metamorphism ; 5 : lherzolite bodies ; 6 : outcrops of granulitic basement rocks ; 7 : main external thrusts ; 8 : North Pyrenean Fault

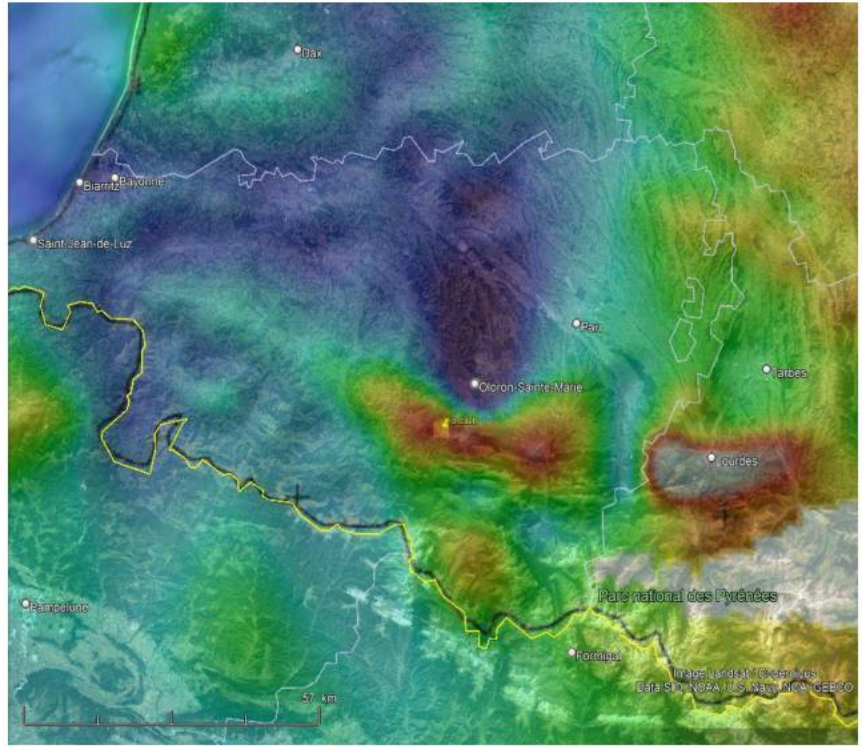
4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

De l'hydrogène natif dans les Pyrénées ?

GéolVal

HAUT BÉARN

Les Pyrénées Atlantiques et plus particulièrement le Bassin de Mauléon est marqué par de très fortes anomalies magnétique et gravimétrique positive suggérant la présence de roches denses et de forte épaisseur,
en conséquence, et du fait de la présence des affleurements, on retient une possible présence de roches de type lherzolites à faible profondeur



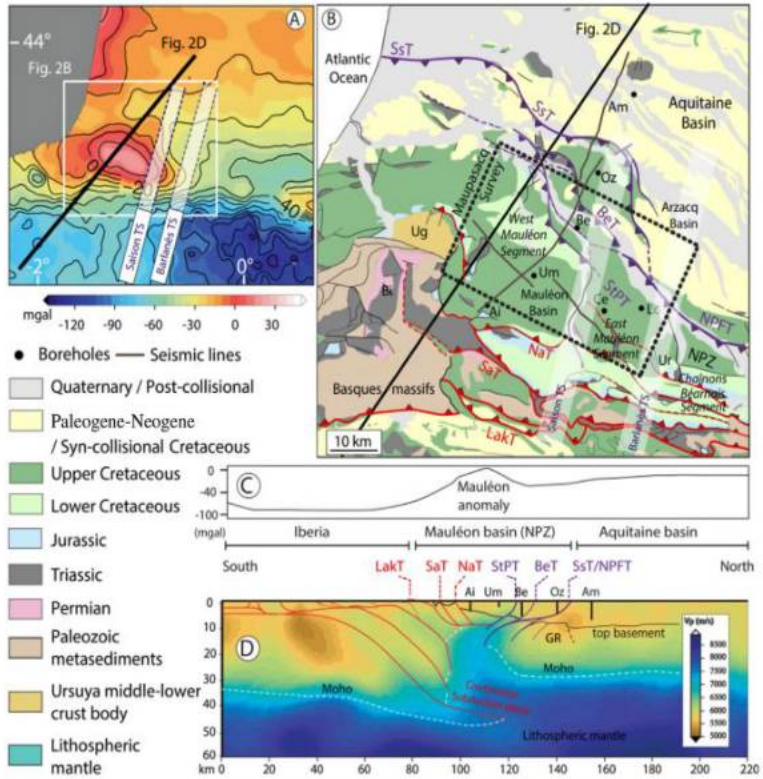
Ci contre : carte des anomalies magnétiques en jaune et rouge :
deux anomalies importantes : Lourdes et Mauléon

4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

De l'H_2 natif dans les Pyrénées ?

Un des modèles possible : Lors de la séparation entre l'Ibérie et l'Europe il y a 100 ma, la dénudation du manteau et la serpentinisation des lherzolites pourraient (ont pu ?) permettre la génération d'H_2.

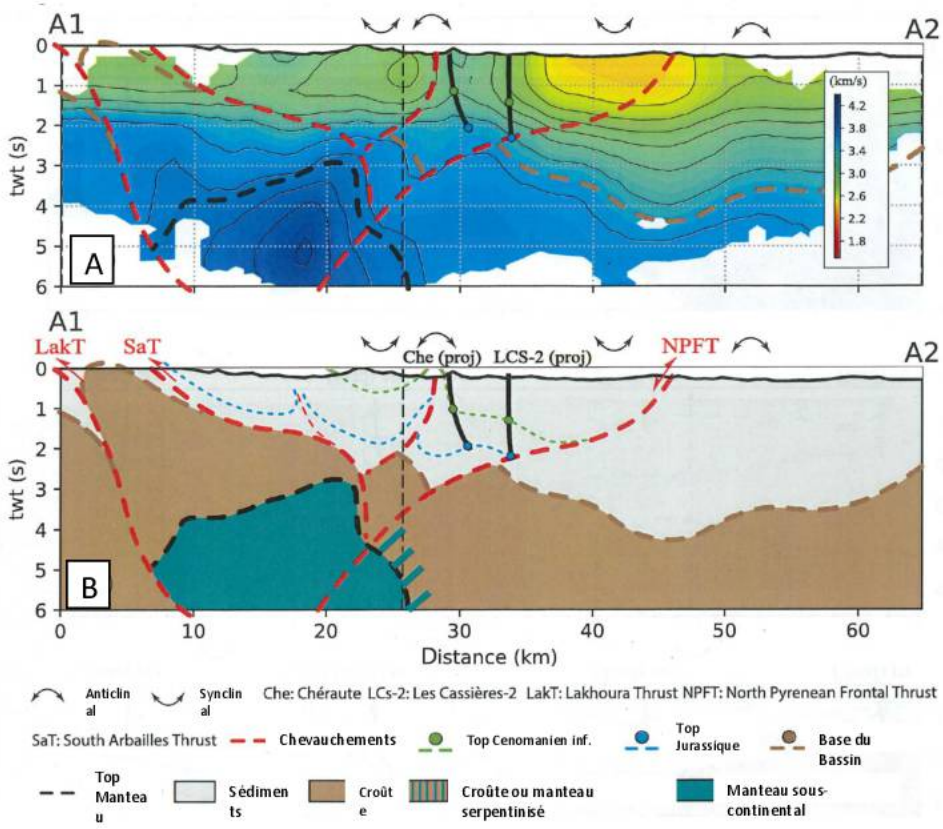
D'après Y. Lagabrielle et B. Corre



4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

De l'H_2 natif dans les Pyrénées ?

Profile 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)



4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

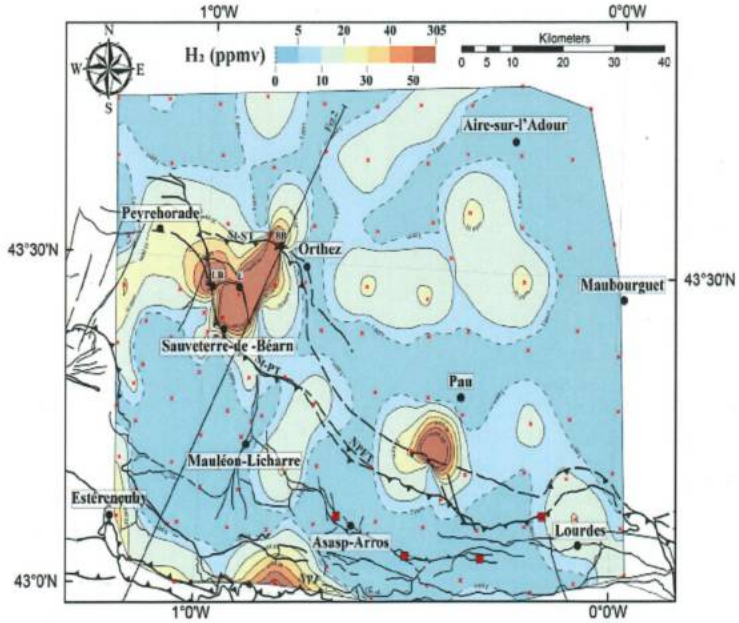
GéolVal

HAUT BÉARN

De l' H_2 natif dans les Pyrénées ?

Carte de concentration en hydrogène des sols du bassin de Mauléon-Arzacq, d'après Lefeuvre et al., (2021)

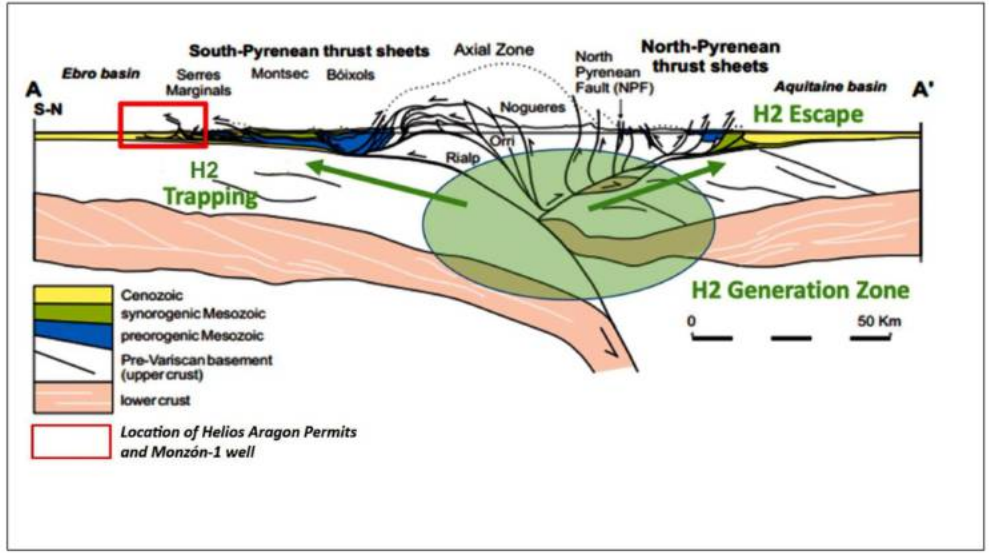
Ces émanations importantes en bordure de chevauchements sont elles le témoin d'accumulations en profondeur ou de fuites permanentes ?



4ème édition JOURNEES NATIONALES DE LA GEOLOGIE Du 20 au 22 MAI 2022

De l'H_2 natif dans les Pyrénées ?

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**



GéolVal

HAUT BÉARN

Conclusions : prospecter et trouver de l'H_2 ?

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.

Les chercheurs travaillent sur l'origine de l'hydrogène naturel, la caractérisation et la quantification des flux, le transport de l'hydrogène et son piégeage (ou non !). Les équipes industrielles se concentrent sur les moyens d'identification géophysiques, sur les capteurs géochimiques et l'élaboration de guides d'exploration.

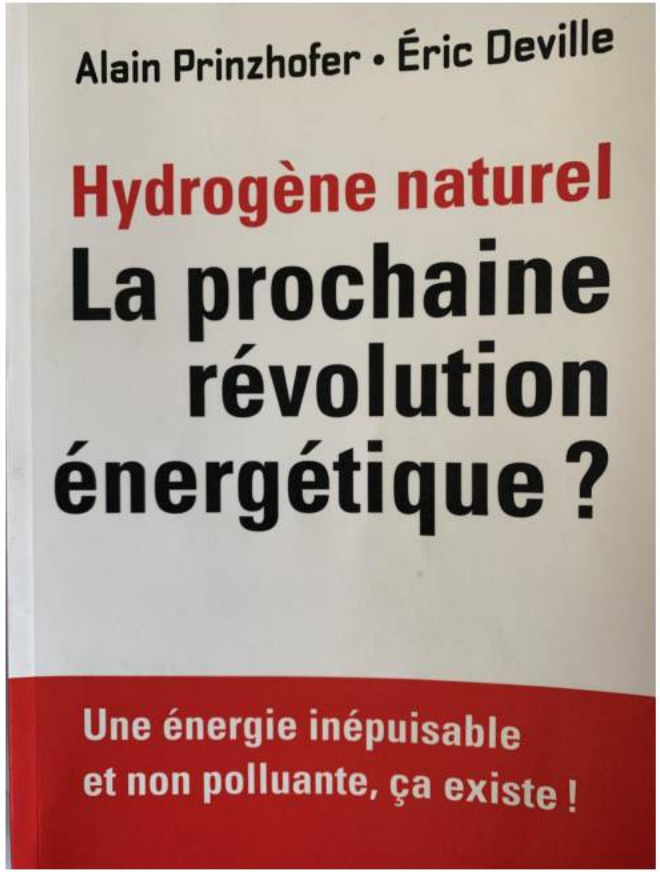
Les chercheurs français sont parmi les leaders de cette recherche. A la demande du CNRS , **le premier congrès mondial sur l'H2 natif a eu lieu en 2021 à Paris**. En France, sous l'impulsion d'AVENIA, des entités publiques et privées se sont regroupées pour évaluer la ressource en hydrogène naturel dans les territoires : le consortium eartH_2. Le Conseil Régional de **Nouvelle Aquitaine** a décidé fin 2021 **le lancement du projet H_2NA**, destiné à caractériser le [ou les] système[s] hydrogène de la région, évaluer les concentrations et les flux, et **localiser les possibles accumulations.** Les partenaires du projet CVA, 45-8, ENGIE, STORENGY, UPPA et BRGM ont mis au point un calendrier de 3 ans (2022-2025). Enfin l''H_2 naturel a été ajouté au Code Minier français dans une **ordonnance parue au JORF mi-avril 2022.** Une belle victoire qui ouvre des perspectives prometteuses après 3 ans de lobbying !

L' H_2 naturel est une réalité géologique et peut-être une ressource d'avenir. Il est produit naturellement par la Terre, peut migrer et **ou s'accumuler, ou? le plus souvent ? fuir jusqu'à la surface ?**

That's the question

Pour aller plus loin :

-Revue SGF- Géochronique Hors série : Les sciences de la Terre au lycée. Décembre 2020

- H_2 naturel : La prochaine révolution énergétique par A. Prinzhofer et E. Deville -2015

- Revue SGF - Géologues n° 213 L'hydrogène et les gaz rares coordonné par Marc Blaizot et Jean-Marc Fleury- Juin 2022