



Les Ressources en Hydrogène Naturel du Sous-Sol

22 Avril 2023

Philippe Dubreuilh

Géologue



Présentation au CPIE Littoral Basque



- ❑ **Introduction**
- ❑ **Propriétés principales de la molécule d'hydrogène (H₂)**
- ❑ **Connaissances générales sur l'hydrogène naturel**
 - Historique, génération, migration, perte, accumulation, émanation
 - Estimation des ressources
- ❑ **Exploration et production d'hydrogène naturel**
 - Exploration
 - Production et exploration, l'exemple du Mali
- ❑ **Contexte français**
 - Situation générale en France
 - Situation en Nouvelle Aquitaine (*La Région, les Pyrénées Atlantiques*)
- ❑ **Contexte dans d'autres pays**
 - Afrique, Amérique du Sud, Australie, Europe, Etats-Unis

- **HYDROGENE** : l'atome le plus simple (*un proton, un électron*) et le plus abondant dans l'univers (*92-93% en nombre*)
- Sur la Terre, l'hydrogène est surtout lié à l'O₂ et au carbone, rare sous sa forme moléculaire H₂
- Dans le sous-sol, l'hydrogène (H₂) existe, c'est une certitude. Il n'est pas rare, serait même abondant (*on y vient...*)

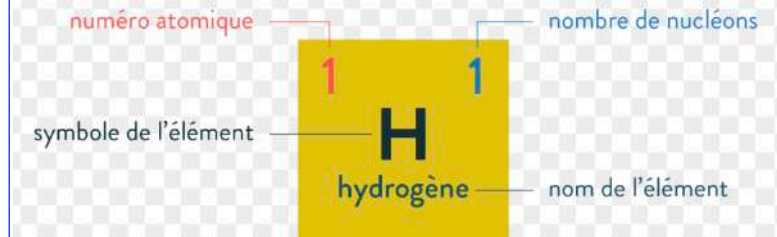


Bcp. d'hydrogène là, mais c'est du H₂O

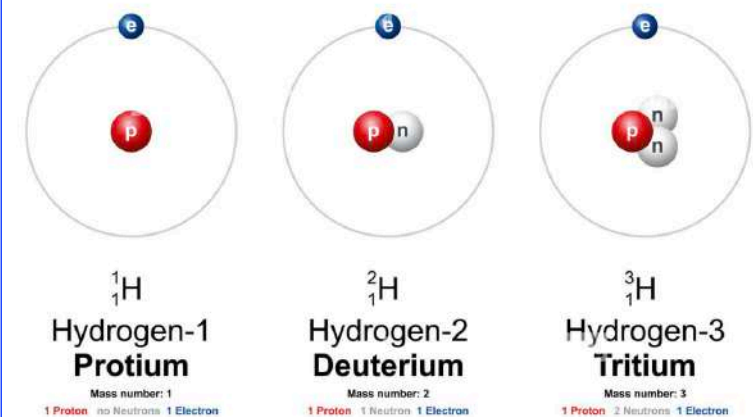
H₂, il faut aller le chercher là, sous-terre

l'atome d'hydrogène

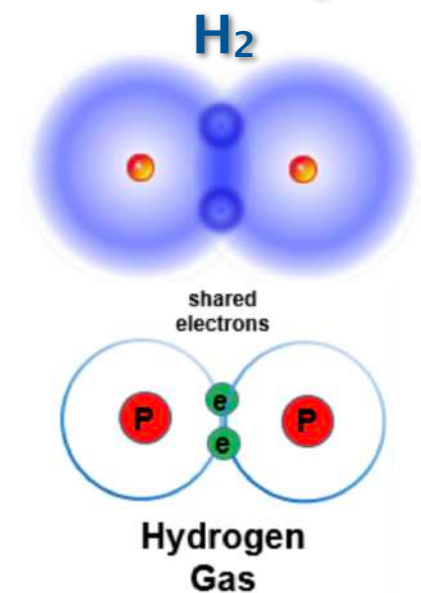
L'hydrogène dans le tableau périodique



MAIN ISOTOPES OF HYDROGEN (¹H)



la molécule d'hydrogène



- L'hydrogène (H_2), gaz industriel important, 3 usages principaux : raffinage du pétrole, engrais azotés, chimie de base. Production mondiale ≈ 94 MT/an. Deux modes de fabrication :
- L'Hydrogène Gris : 95-96 % de la production mondiale, à partir de méthane (CH_4), pétrole ou charbon
 - ★ Production très polluante : émission de 10 kg de CO_2 par kg d' H_2 produit
 - * Dans le monde ≈ 940 MT de CO_2 /an : 2% des GES
 - * En France $\approx 0,9$ MT d' H_2 produit : ≈ 11 MT de CO_2 /an : 7,5 % des GES de l'industrie
- L'Hydrogène Vert : 4-5 % de la production mondiale, par électrolyse de l'eau avec de l'électricité décarbonée, renouvelable et excédentaire
 - ★ Production bas-carbone certes, mais besoin très important en ressources : 55 kWh d'électricité et ≈ 10 l d'eau par kg d' H_2 produit. Rendement énergétique de la filière complète très faible $\approx 25\%$



En complément de **l'hydrogène vert**, une des voies pour produire de l'hydrogène décarboné plus sobrement serait : l'extraction d'hydrogène naturel du sous-sol

1) L'hydrogène naturel du sous-sol (*ou hydrogène natif*) représente une nouvelle énergie primaire, renouvelable, décarbonée et potentiellement abondante

2) La recherche, l'exploration et la production de ressources en hydrogène naturel du sous-sol constituent une nouvelle filière énergétique très peu connue, commençant à se structurer notamment en France



- Ainsi, l'hydrogène natif s'intégrerait dans l'ensemble des énergies renouvelables et décarbonées
- Aurait un rôle important dans le remplacement de l'hydrogène gris très émetteur de CO₂
- Contribuerait à la décarbonation future :
 - Industries lourdes (*Ciment, acier, verre, etc.*)
 - Transports lourds (*Camions, bateaux, trains, avions (?), etc.*)
 - Engins lourds (*BTP, mine, carrière, forêt, agriculture, etc.*)
- Donc, aiderait à stabiliser et à atténuer le dérèglement climatique

❑ Propriétés principales de la molécule d'hydrogène (H₂)

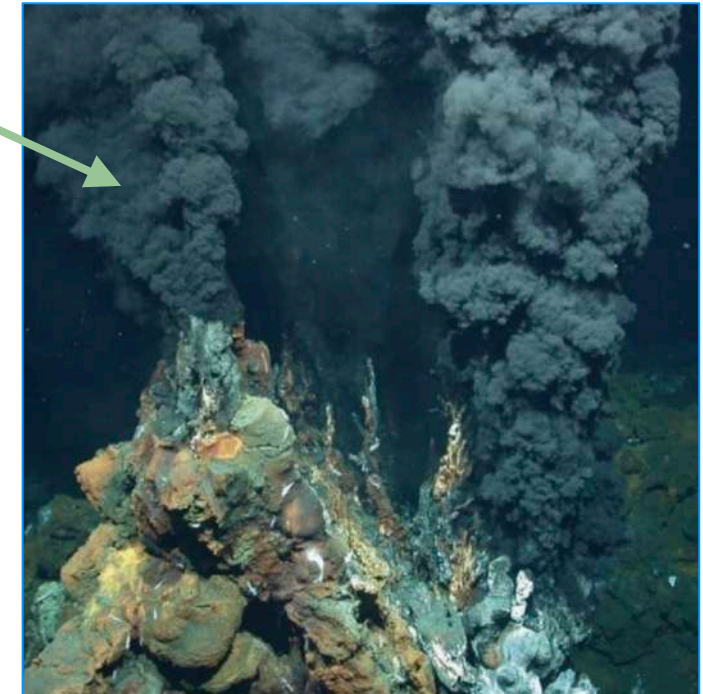
- Le gaz le plus énergétique (*inflammable, explosif*)
- Le gaz le plus léger (*s'échappe de l'atmosphère terrestre*)
- La molécule la plus petite (*diffuse à travers de nombreux matériaux*)
- Un gaz très réactif (*beaucoup moins entre 100-200 °C*)

<i>Propriétés</i>	<i>H₂</i>	<i>Remarques</i>
Pouvoir calorifique supérieur (kWh/kg)	39	3 fois et 2,6 fois plus énergétique que l'essence (13 kWh/kg) et le gaz naturel (15 kWh/kg)
Température de liquéfaction (en °C à 1 bar)	-253	-160°C pour le gaz naturel
Densité gazeuse (kg/m ³ à 0°C à P atmosphérique)	0,09	14 fois plus léger que l'air (1,29 kg/m ³)
Concentration dans l'air (ppmv)	5	Très rare dans l'air (en transit vers l'espace)
Solubilité dans l'eau (mg/l à 0°C)	1,9	Faible, plus soluble lorsque P et T augmentent, mais effet négatif de la salinité de l'eau

■ Historique

- 1977-80 : découverte d' H_2 dissous dans les sources hydrothermales des rides volcaniques médio-océaniques (*Max. de 50-70 % de la phase gazeuse dissoute*)
- 1921 au présent : H_2 sporadiquement et fortuitement mesuré dans des forages d'hydrocarbure, d'eau et dans des mines (*De qq. % à 80% de concentration. Mais aucune suite; l'exploration de gaz, c'était pour le méthane CH_4*)
- 2007-2008 : des géologues russes alertent des collègues français de l'IFPEN : de fortes émanations d' H_2 gazeux mesurées en surface en Russie
- 2010 : Prinzhofer et Deville, des géologues français, confirment les résultats russes (*Publient un livre en 2015*)

Fumeur noir
(source hydrothermale sous-marine)



□ De l'historique au présent

- La recherche sur l'H₂ natif : branche très récente des Sciences de la Terre (*≈ 15 ans*)
- Progresse rapidement dans qq. pays, dont la France
- Nombreux articles scientifiques, thèses, conférences nationales et internationales (*depuis ≈ 2015*)
- Qq. articles dans la presse francophone (*2013-2023*)
- La une de La République des Pyrénées du 15/03/23

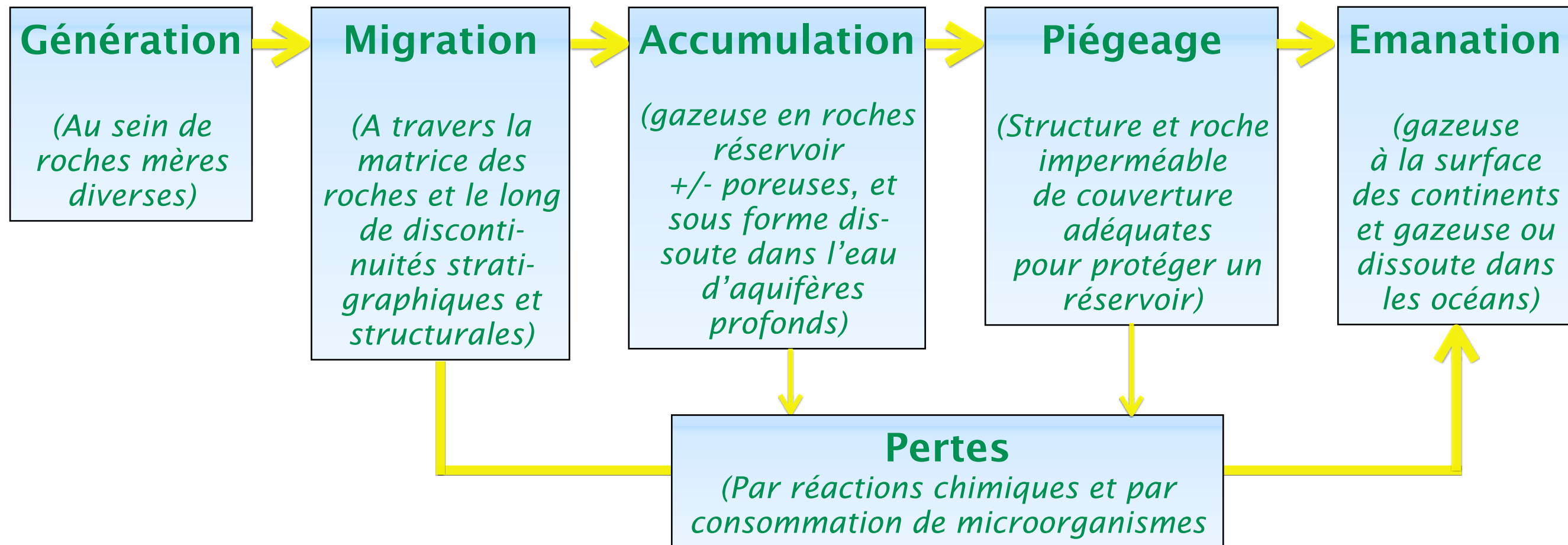


Au présent

- Dans la presse anglophone (02/2023), allemande et espagnole (03/2023)



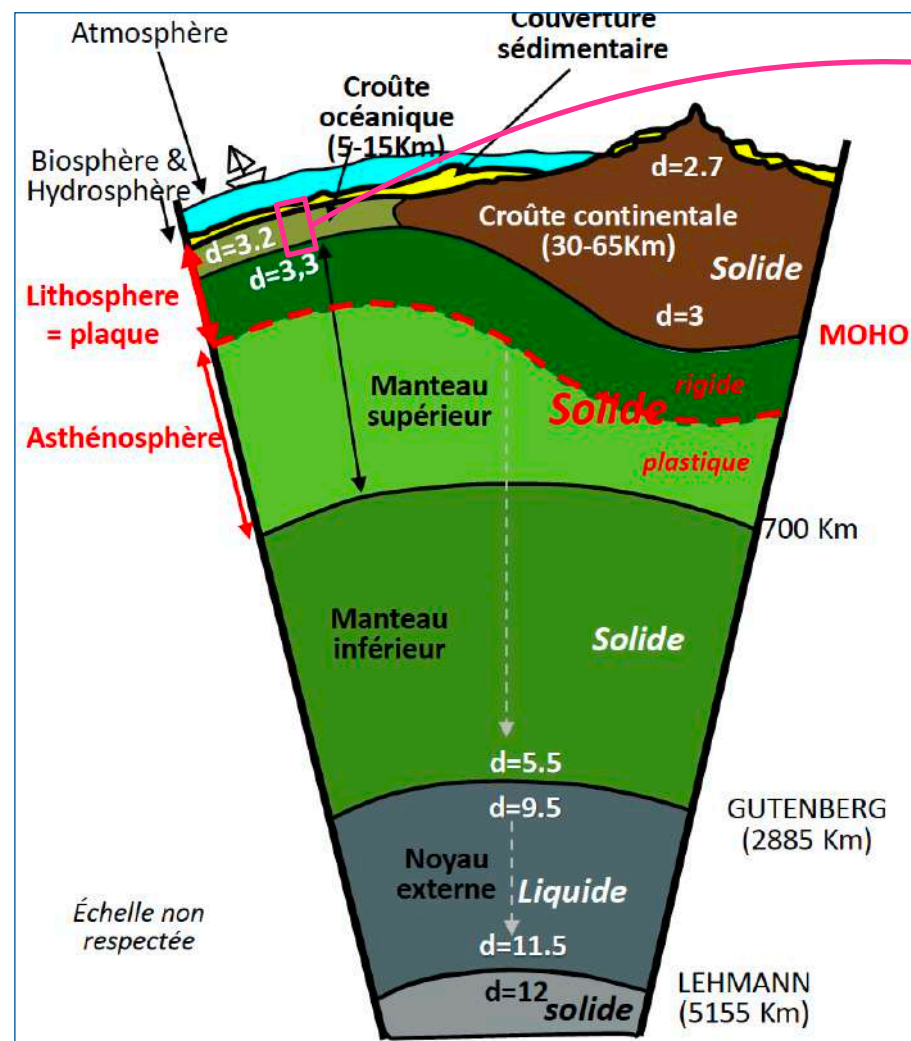
A l'instar du Système Pétrolier, il est logique d'aborder les ressources en hydrogène natif en tant que Système Hydrogène



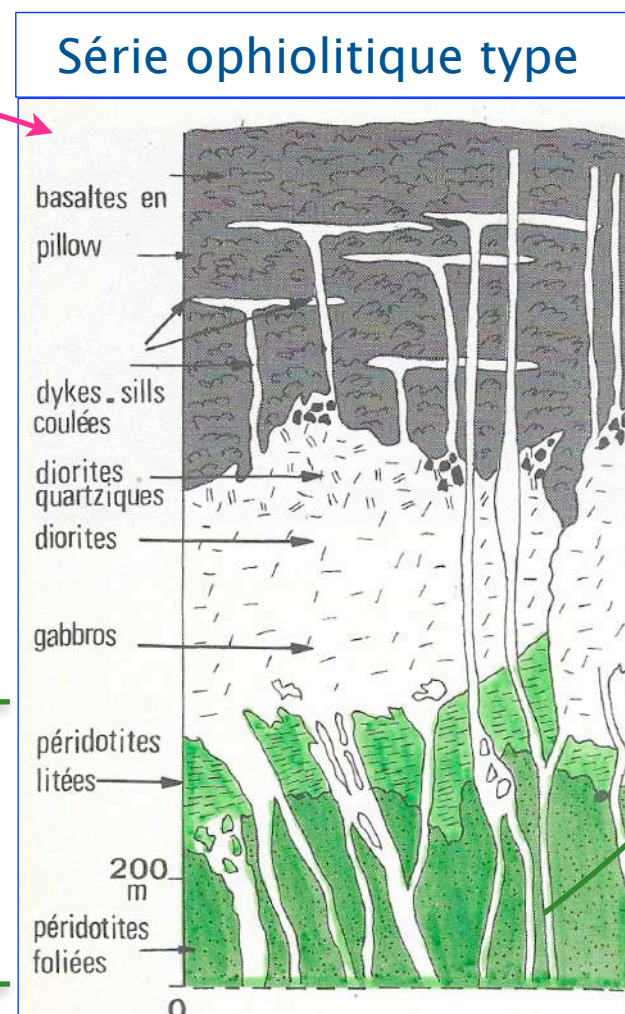
□ Génération d'H₂ par interactions eau/roche dans divers contextes géologiques avec infiltration d'eau météorique sur les continents, eau de mer dans les croûtes océaniques

- 2 réactions géochimiques dominantes : serpentinisation, radiolyse de l'eau

la serpentinisation



Péridotites

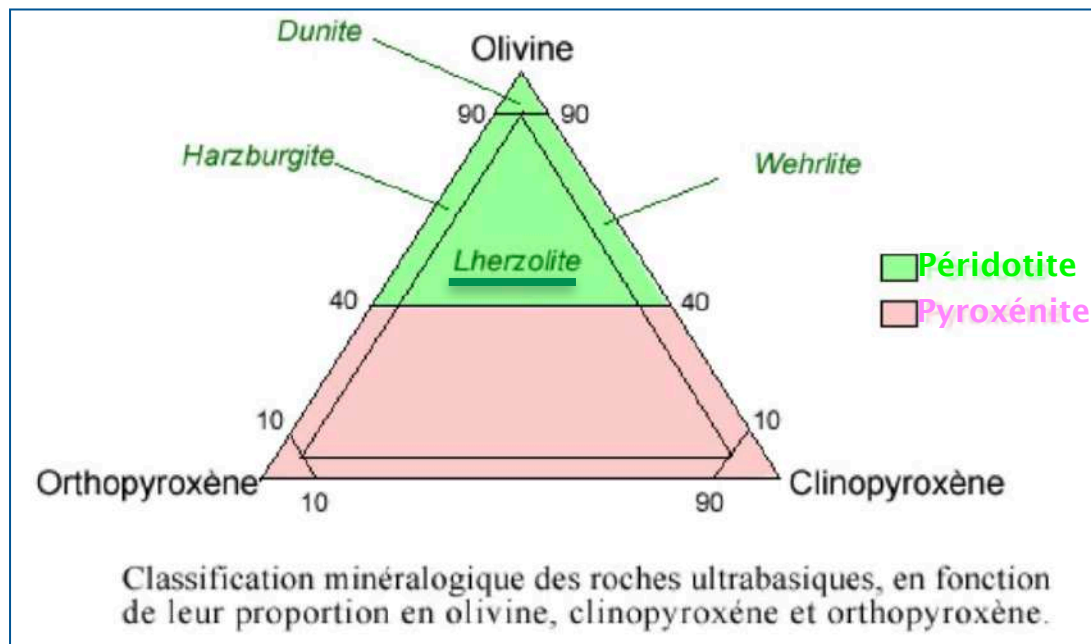


Roches mères :

Les péridotites, roches vertes grenues ultra-basiques (< 45% de SiO₂) dans la zone croûte océanique/manteau supérieur

(Des lambeaux, des écailles d'ophiolites charriés en montagne: à l'affleurement ou sous couverture)

la serpentinisation



Roches mères :

Les péridotites, constituées d'olivines et de pyroxènes. Les olivines: série continue de deux minéraux: la fostérite (Mg_2SiO_4) et la fayalite (Fe_2SiO_4)



La réaction de serpentinisation :

L'altération de l'**olivine** par l'eau à des P et T assez faibles ($50 \text{ MPa} = 500 \text{ bar}$, $200-350^\circ\text{C}$) : production de **serpentine**, de **magnétite** et dégagement d' **H_2 gazeux** (le Fe^{++} est oxydé en Fe^{+++}).

Cette réaction produit une diminution de densité (3,3 à 2,6), une augmentation de volume ($\approx 40\%$) de la roche mère et une fracturation induite favorable à la circulation des fluides

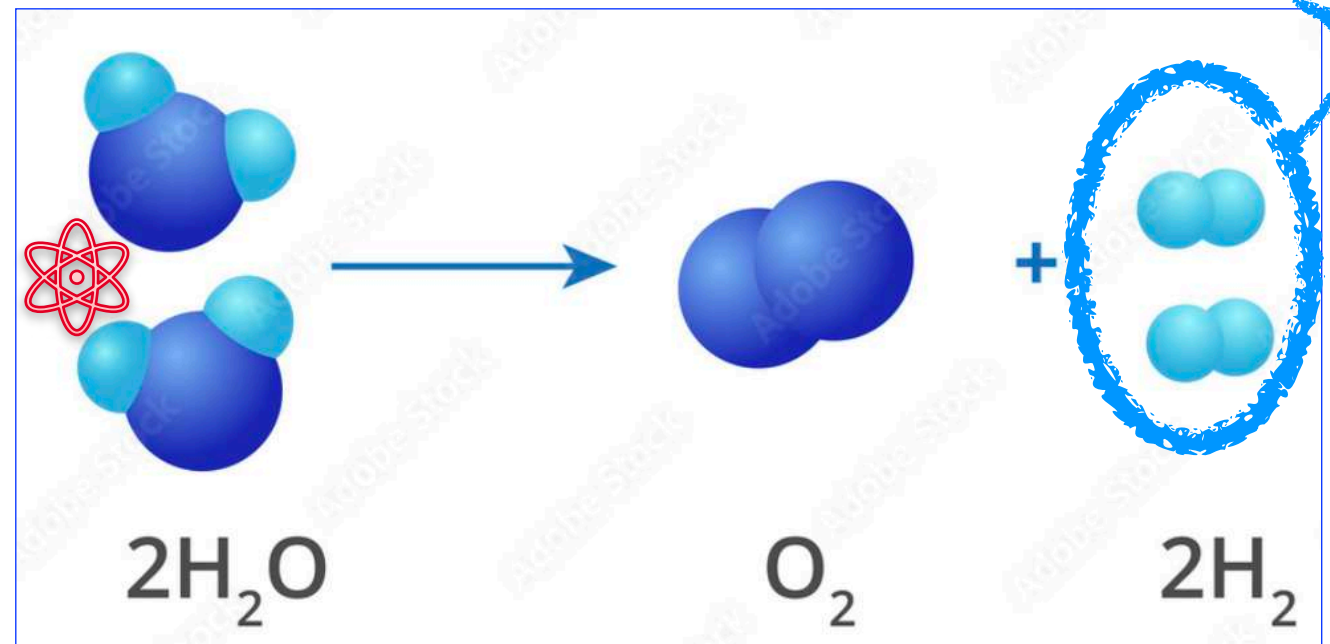
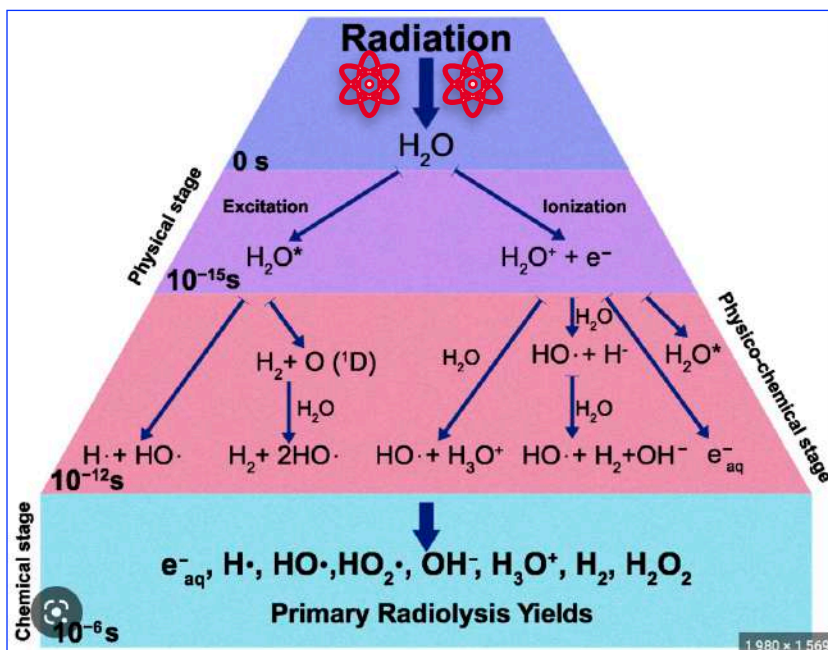
la radiolyse de l'eau

Roches mères :

Les cratons, vastes aires continentales stables et épaisses formées de roches granitiques et métamorphiques associées, généralement datées du Primaire et Précambrien (> 540 Ma). L' ^{235}U , le ^{232}Th et le ^{40}K radioactifs de certains minéraux émettent naturellement des radiations

La réaction de radiolyse :

Réactions physico-chimiques complexes. Les radiations ionisantes "cassent" les molécules d'eau. Au final, l'eau est décomposée en O_2 avec dégagement d' H_2 gazeux

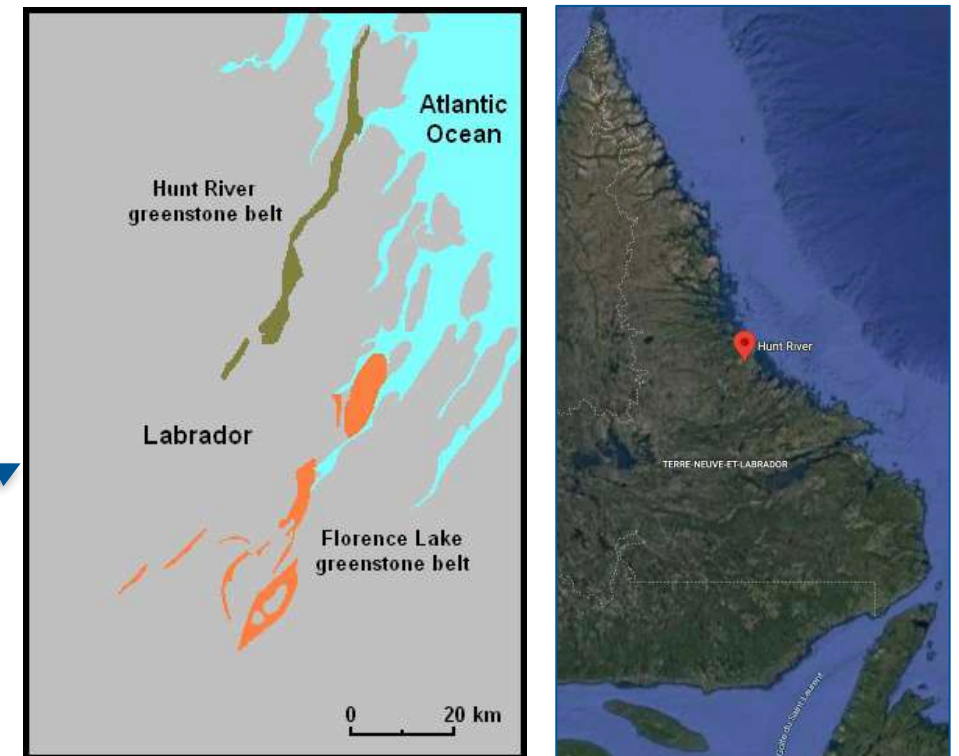


□ Génération d'H₂ naturel dans d'autres contextes géologiques

○ Ceintures de roches vertes *

- Zones linéaires de roches basiques à ultrabasiques et sédimentaires métamorphisées et "écrasées" entre des cratons de granite et gneiss précambriens (*âge > 540 MA*)

Ceintures de roches vertes au Labrador



○ Formations de fer rubanées *

- Roches sédimentaires précambriennes très riches en fer (> 15%) en couches mm/dcm à métrique (*Fe⁺⁺ et fer natif en partie oxydés en Fe⁺⁺⁺*)

Formation de fer rubanée



* *Oxydation par l'eau de Fe⁺⁺ de minéraux en Fe⁺⁺⁺ avec dégagement d'H₂*

❑ Génération d'H₂ naturel dans d'autres contextes géologiques

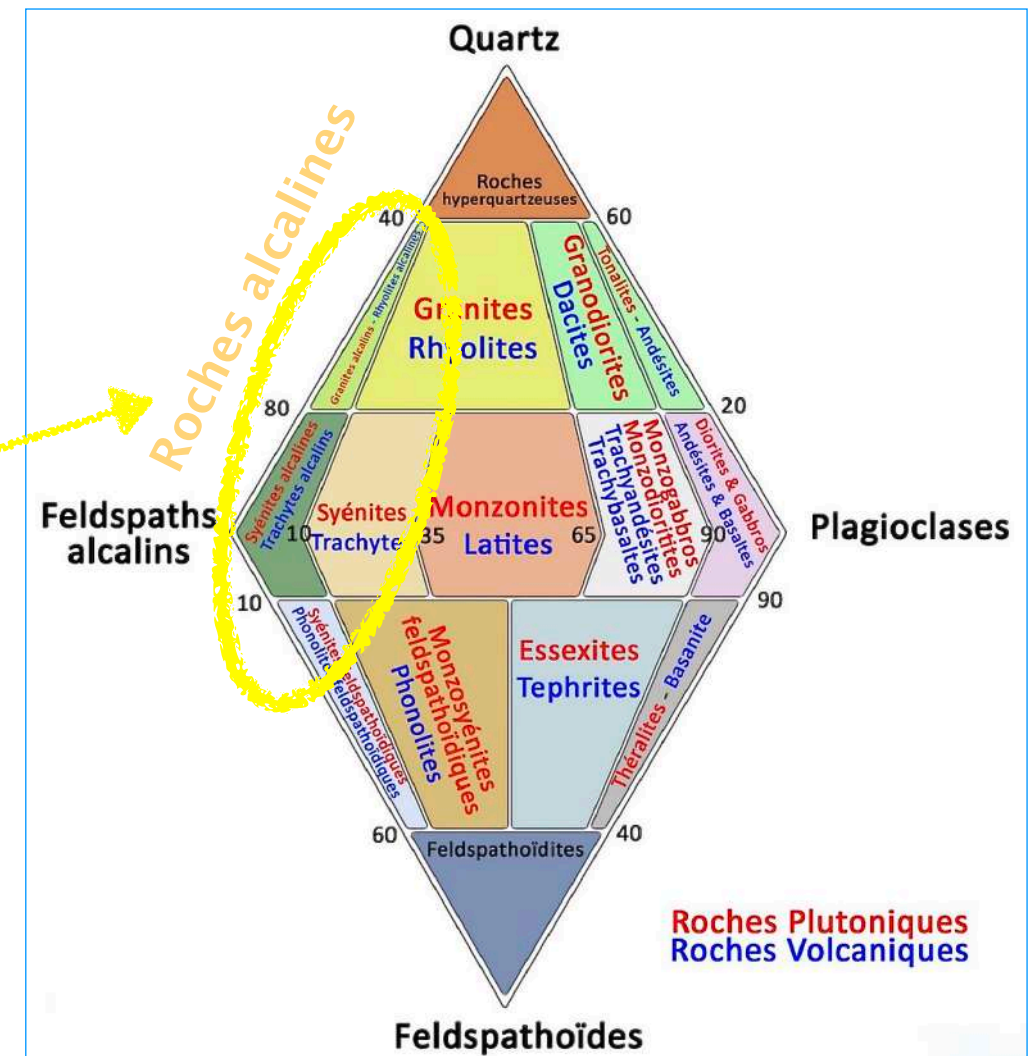
○ Roches plutoniques et volcaniques alcalines *

- Détections dans des granites et syénites alcalins et leurs couvertures sédimentaires (*Strange Lake, Canada; Groenland; péninsule de Kola*). L'altération d'un minéral commun à ces roches est la source de l'H₂ (*Amphibole : Arfvedsonite*)

○ Association aux gisements d'or *

- Emanations d'H₂ au niveau de dépressions proches de 32 gisements d'or avec niveaux de sidérite (Fe⁺⁺CO₃⁻); dissolution de la sidérite => Fe⁺⁺

* Oxydation par l'eau de Fe⁺⁺ de minéraux en Fe⁺⁺⁺ avec dégagement d'H₂



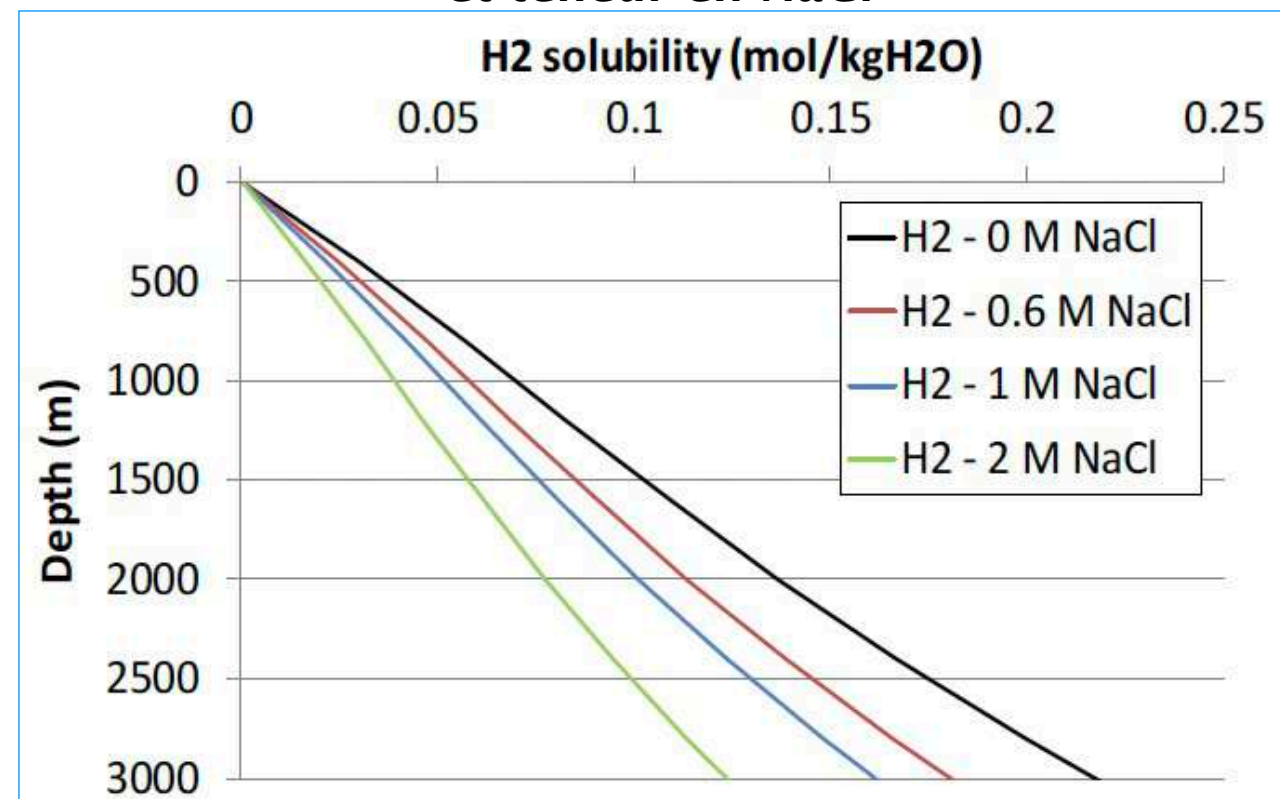
○ Hydrogène primordial

- Théorie russe de dégazage en continu d'hydrogène du noyau et manteau de la Terre (*L'hydrogène y aurait été incorporé lors des phases de formation de la Terre*)

□ Migration à partir des roches mères et accumulation

- **Migration** facilitée du gaz H_2 (*la plus petite et plus légère molécule de gaz*) à travers la matrice des roches, le long de discontinuités stratigraphiques et des réseaux de fractures et failles
- **Migration et accumulation par dissolution** : dans l'eau d'aquifères profonds (*Plus soluble lorsque P et T augmentent; mais effet négatif de la salinité de l'eau*)

Solubilité d' H_2 dans l'eau, fonction de la profondeur et teneur en NaCl



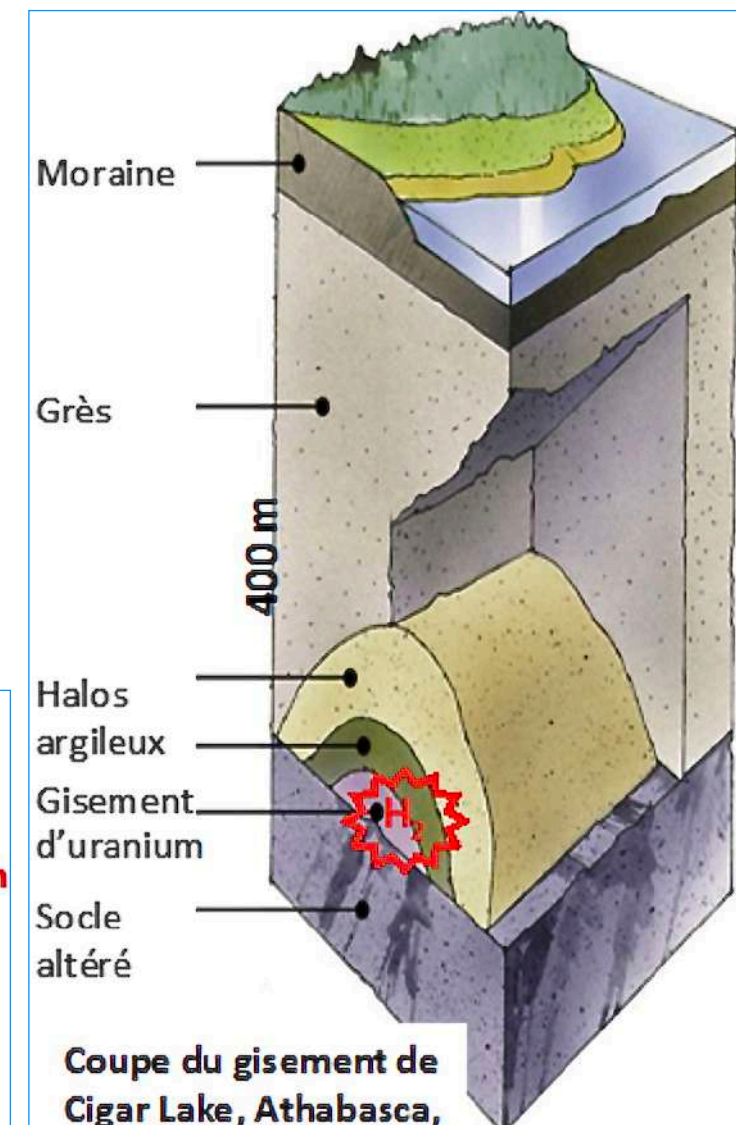
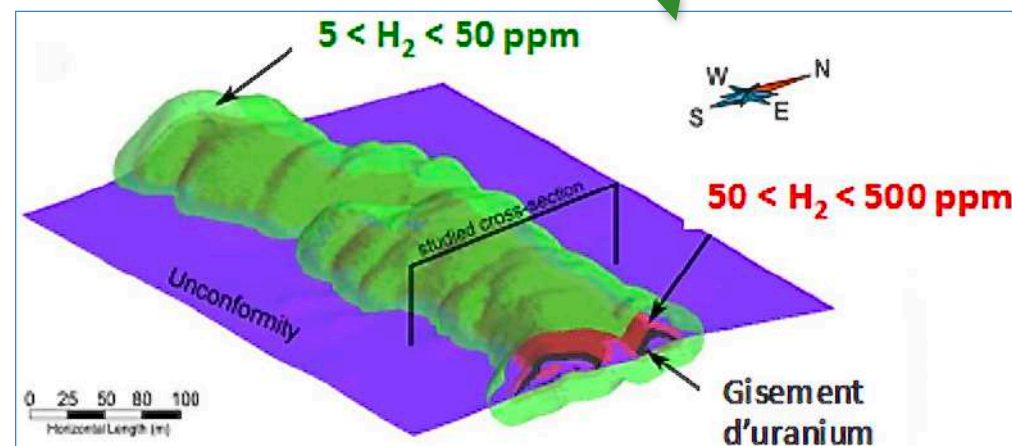


□ Pertes

- **Par réactions chimiques** : plus favorables à $T > 200^{\circ}\text{C}$ (*avec des minéraux, l' O_2 , le CO_2 , le CH_4 , d'autres hydrocarbures*)
- **Par consommation bactérienne** : plus favorable à $T < 100^{\circ}\text{C}$ et plus proches de la surface. Estimées, mesurées jusqu'à plusieurs dizaines de %

Accumulation et piégeage

- H_2 peut se dissoudre, donc s'accumuler dans l'eau d'aquifères profonds; observé en forages géothermiques (*Co-valorisation de l' H_2 possible*)
- H_2 gazeux peut s'accumuler dans des roches réservoir +/- poreuses et être piégé par des structures et roches imperméables formant des couvertures adéquates
- En roches argileuses; à Cigar Lake Mine : H_2 adsorbé sur des minéraux argileux, max. de 500 ppm d' H_2 mesuré (= 0,5 g/kg de roche)



□ Emanations, deux types

- Sur les continents : Emanations gazeuses en surface (*abondantes, données faciles à obtenir, mesures ponctuelles et des variations dans le temps*)
- Dans les océans : décharge en solution dans les eaux de sources hydrothermales
- Important de les étudier; meilleure compréhension du Système Hydrogène

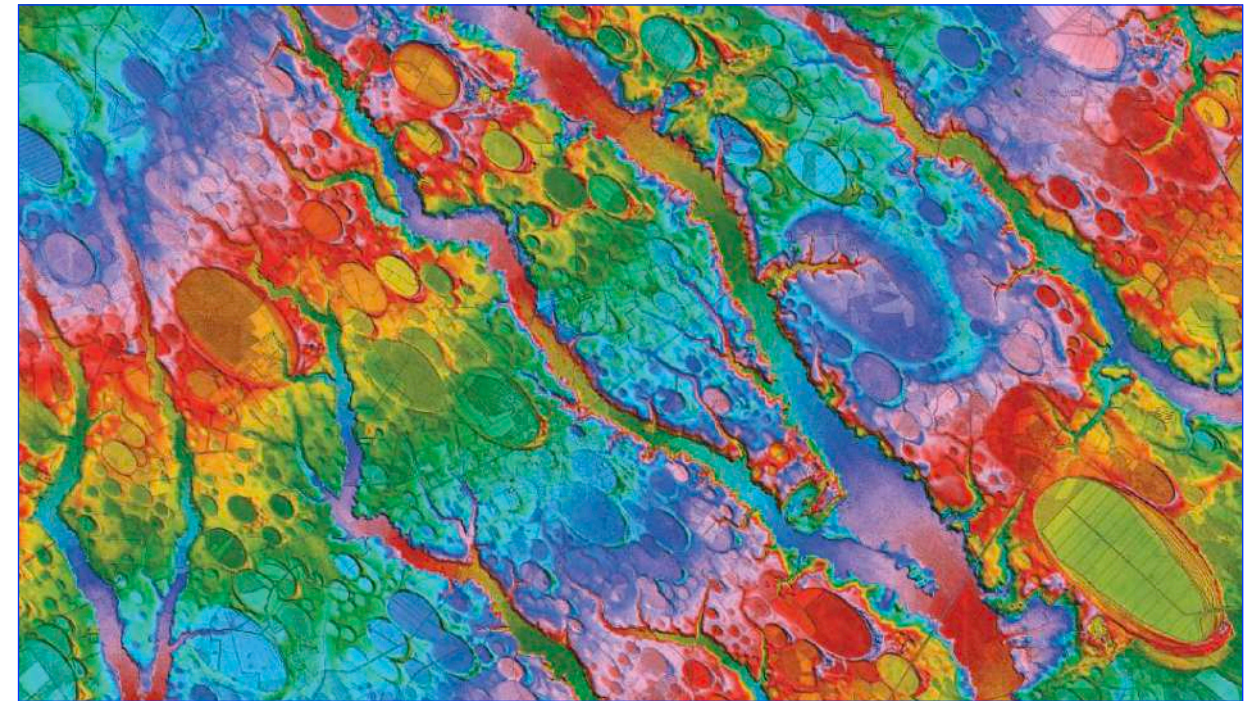


Répartition globale d'émanations d'hydrogène dans trois contextes géologiques

□ Emanations de surface

- Fuites d' H_2 gazeux le long de failles et au niveau de dépressions naturelles circulaires ou ovales de qq. hm à qq. km, parfois appauvries en végétation
- Communément dénommées **"Ronds de Sorcières"** ou **"Cercles de Fées"**
- Parfois alignées selon des axes structuraux (*Failles ?*)
- Localisées en terrains sédimentaires, en couverture de cratons
- Distinctes morphologiquement des dolines calcaires

Bassin de São Francisco, Brésil



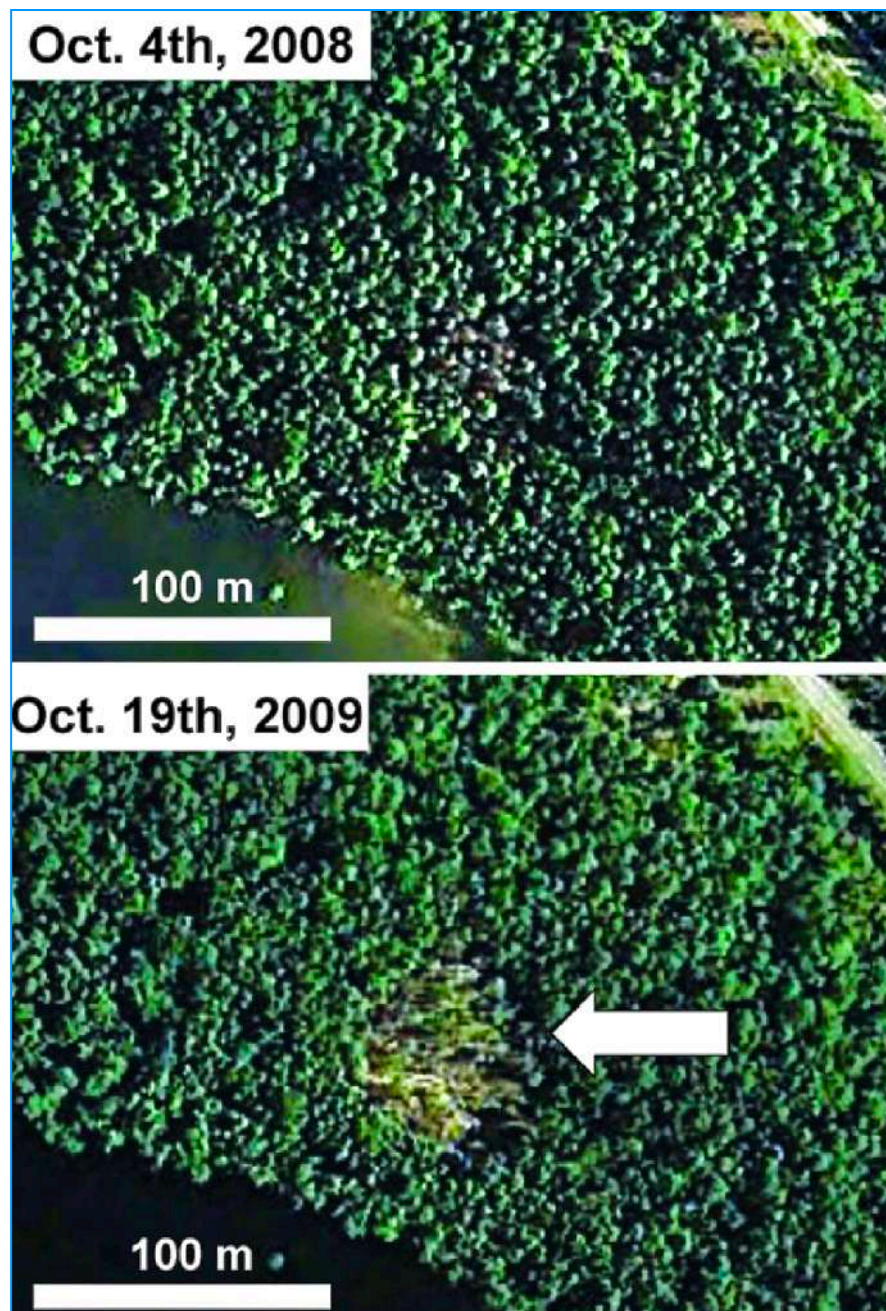
BAYS en Caroline du N, E.U. (satellite et Lidar)



□ Emanations de surface

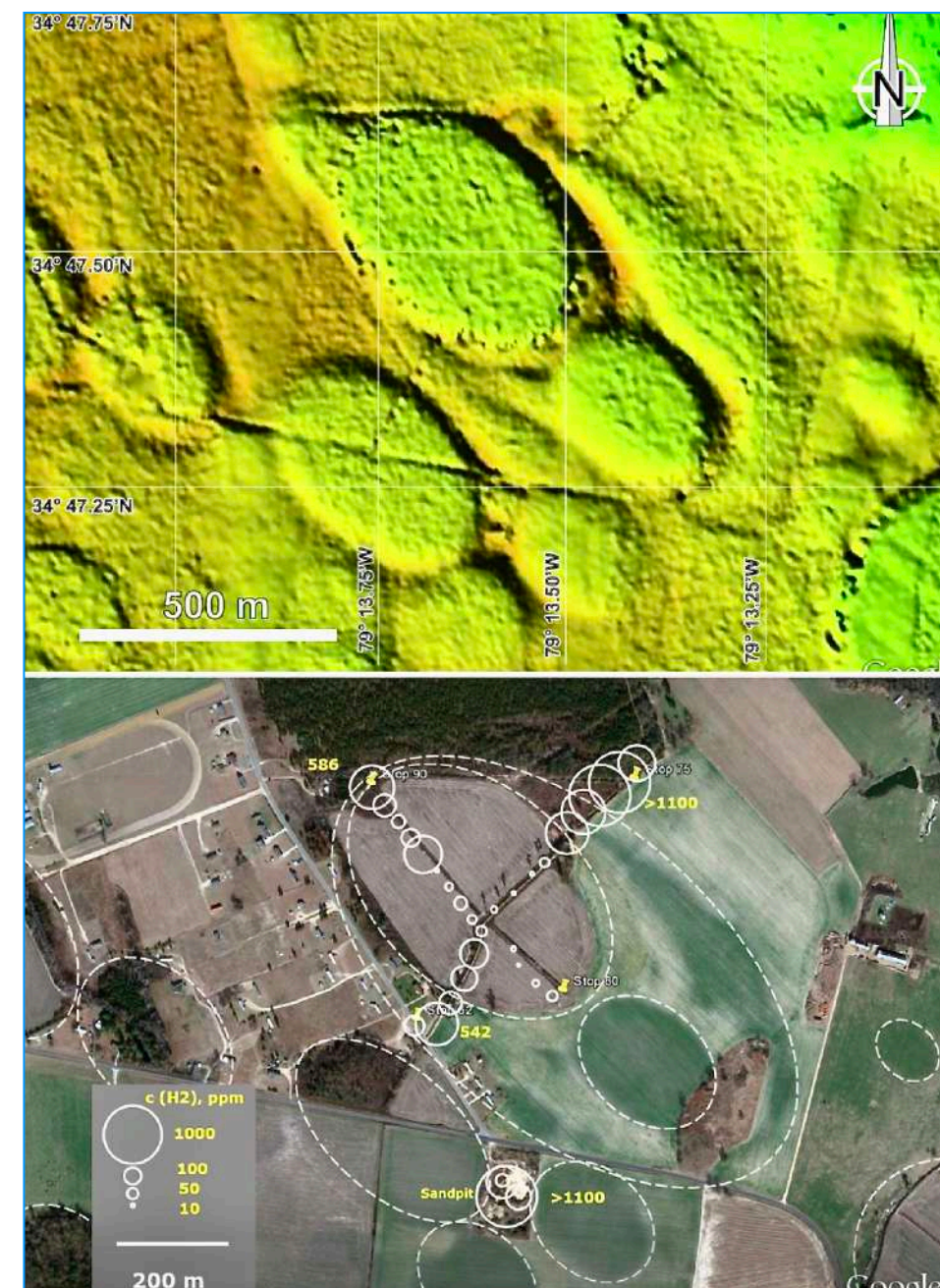
- Création de nouvelles dépressions; système dynamique; mesures d' H_2 confirmées

Jones Lake Bay, Caroline du N, E.U.



- Mesures ponctuelles d' H_2 dans les gaz du sol à ≈ 1 m de profondeur; concentrations souvent $>$ sur les bordures

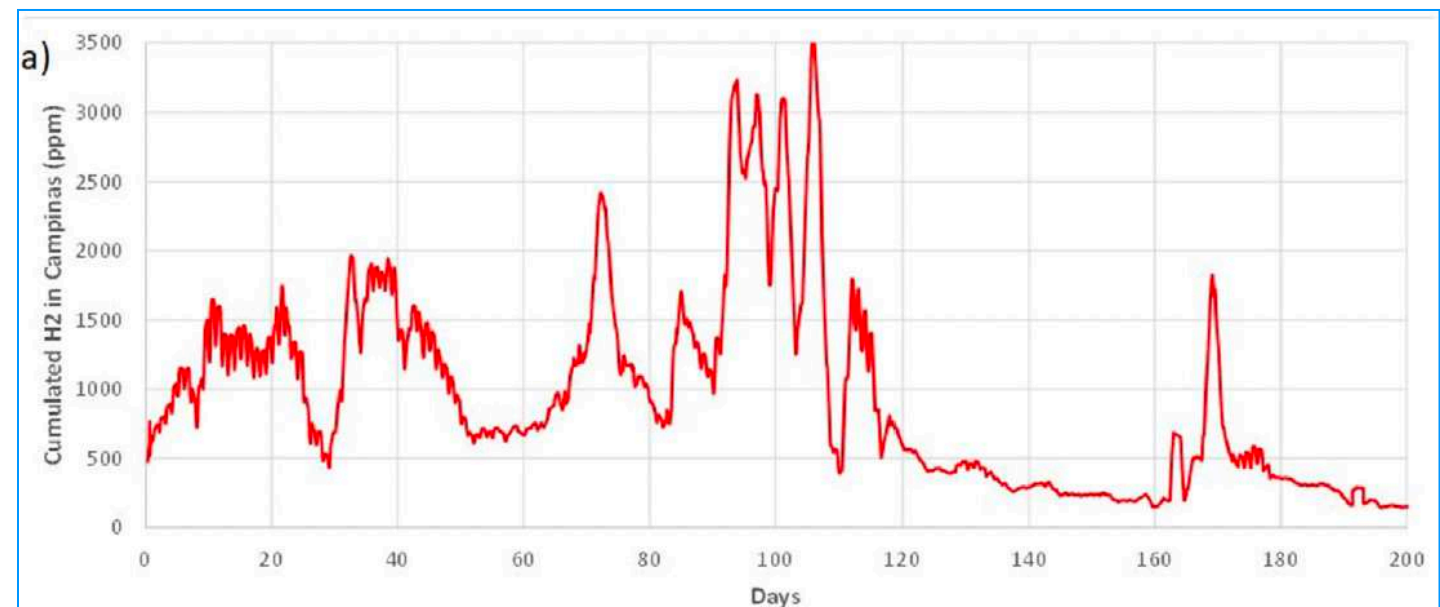
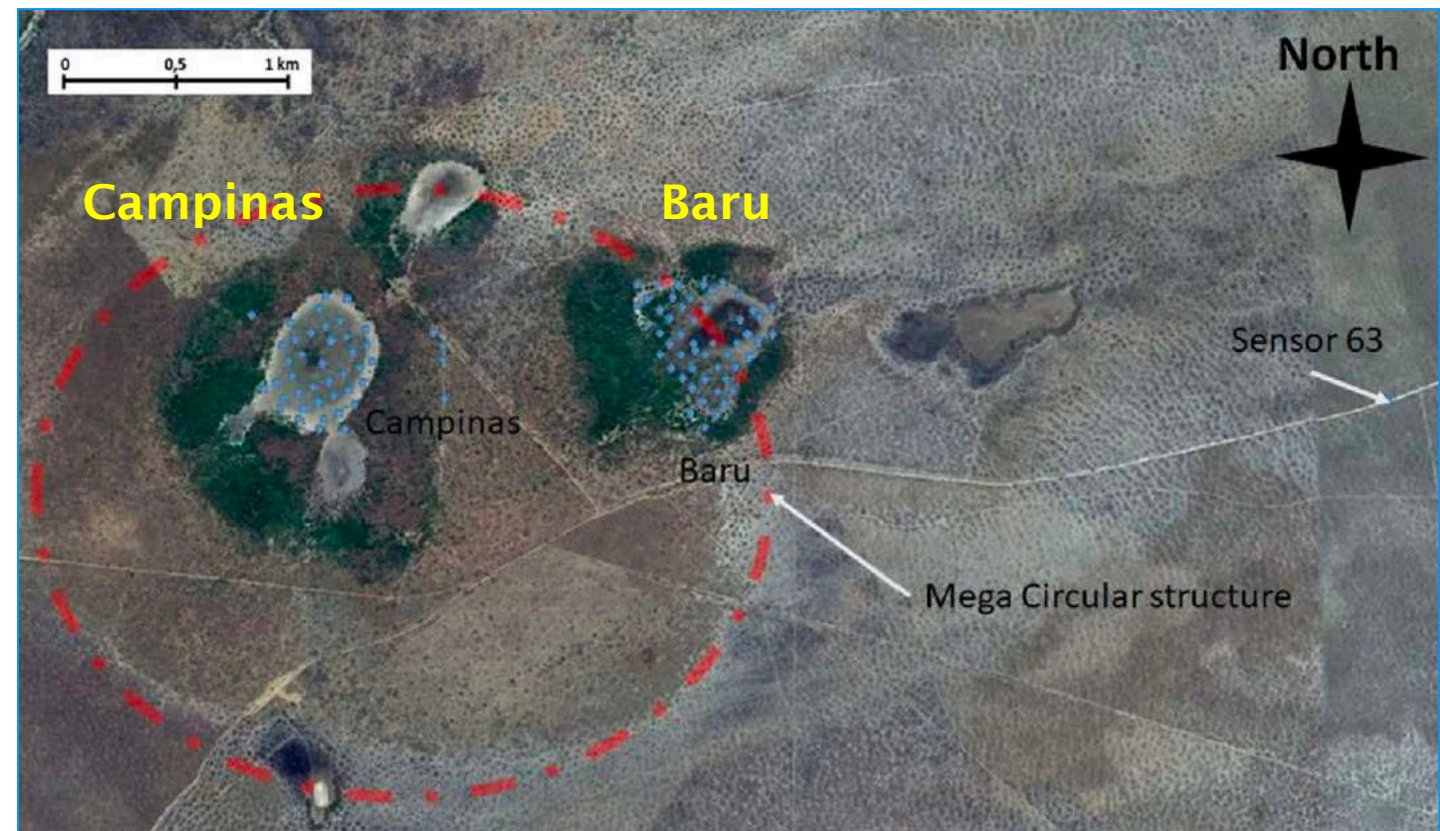
Arthur Road Bay, Caroline du N, E.U.
(Images Lidar et satellite)



□ Emanations de surface

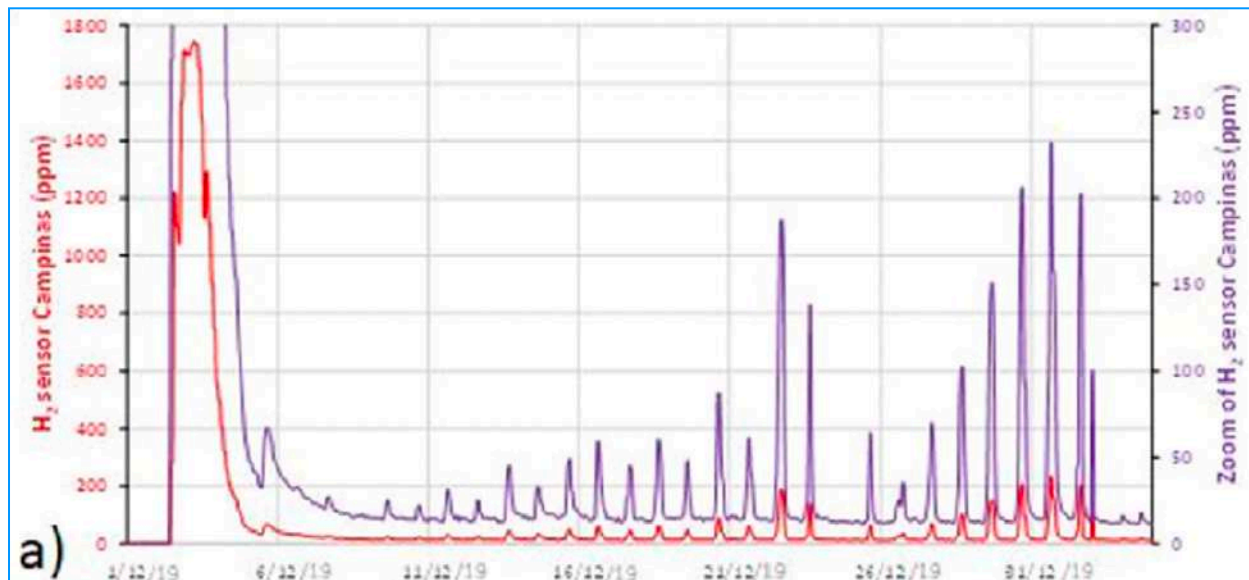
- Surveillance long-terme sur 6-8 mois des émanations de deux cercles de fées de $\approx 0,5$ km de diamètre (*Baru: 50 capteurs; Campinas: 39 capteurs*)
- Mesure horaire de concentration d' H_2 dans les gaz du sol à 80 cm de profondeur
- Dépression Campinas : variations de concentration d' H_2 importantes et irrégulières sur 7 mois (*données cumulées des capteurs*)

Bassin de São Francisco, Brésil

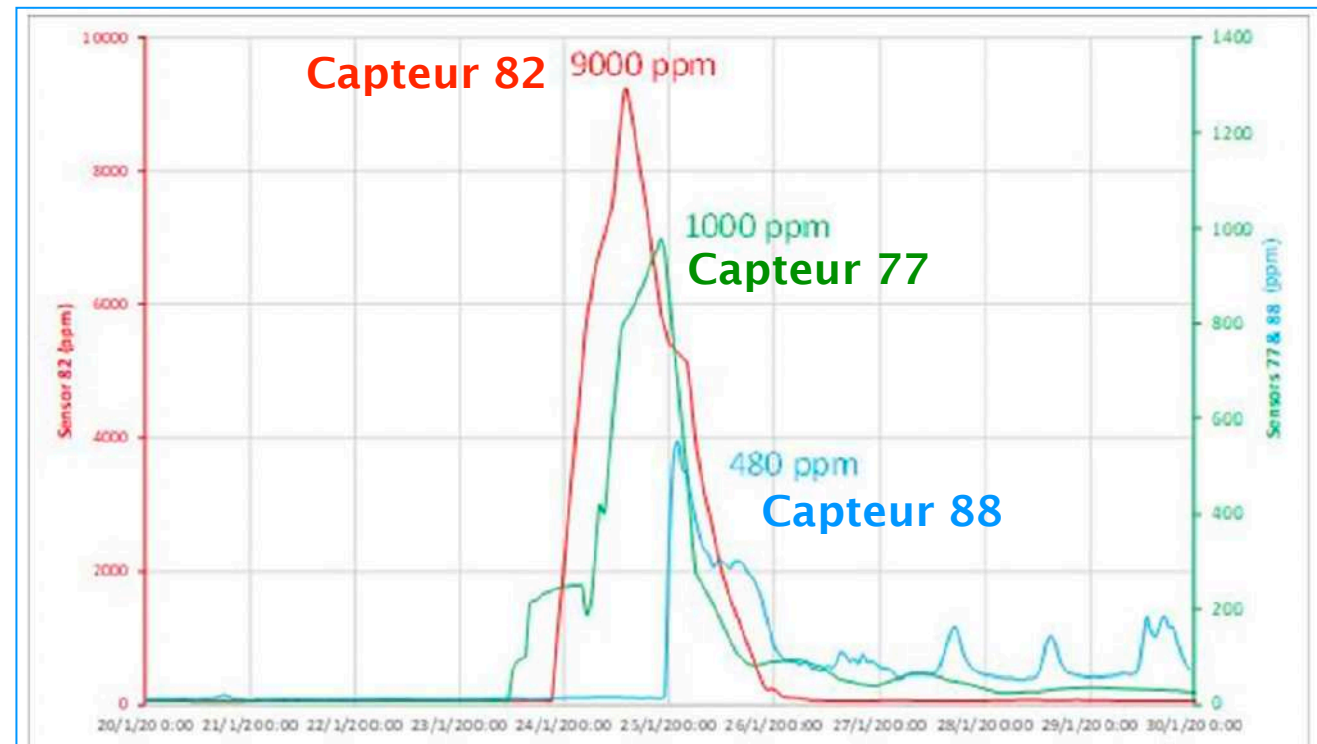


□ Emanations de surface

- Dépression Campinas : variation journalière de concentration d' H_2 avec un pic en milieu de journée



- Dépression Baru : mesure d'une même "bouffée" (?) décalée de $\approx 10h$ et à concentration déclinante dans 3 capteurs



- **Résumé** : émanations périodiques av. un pic journalier; pas toujours continue sur 24h; pulsées avec des bouffées sporadiques importantes



□ Estimation des ressources

- Quantités très importantes d'émissions d' H_2 en surface et dans les océans : la partie mesurable de "l'iceberg hydrogène naturel"
 - Ne servent pas à quantifier les ressources souterraines, mais =>
 - Des quantités plus conséquentes sont générées et présentes dans les croûtes terrestres : la partie "souterraine" de l'iceberg
- Difficultés d'estimation de ressources pour le sous-sol par manque de données de forages



❑ Estimation des ressources

- Des ordres de grandeur intéressants (*probablement sous estimés*)
- Sources hydrothermales des rides volcaniques médio-océaniques : Flux calculé de ≈ 5 à $10 \times \text{Mm}^3 \text{ H}_2/\text{an}$ par source
 - Probablement des milliers de ces sources le long des 60000 km de rides => représenteraient des dizaines/centaines de MT/an d' H_2
- Données d'émanations de surface => calculs de flux d' H_2
 - Emanations par structure/dépression individuelle : 600 à 900 kg/j
 - Emanations globales par surface : 50 à 1900 kg/j/km²
- Modèle 2022 de l'USGS : production/an de sources géologiques bien > aux 94MT/an fabriqués; ressources + renouvellement = besoins pour des milliers d'années (?)



□ Exploration

- Les chercheurs se concentrent sur des contextes, des domaines géologiques particuliers
- Ils développent des stratégies, des guides d'exploration :
 - Focus : bassins sédimentaires en domaine orogénique pouvant receler des structures de piégeage et recouvrant des zones de roches mantelliques
 - Focus : caractérisation de failles profondes enracinées dans des roches-mères profondes et diversifiées et capables d'en drainer de l' H_2
 - Focus : roches plutoniques alcalines, moins étudiées que les péridotites mais offrant des prospects d'exploration

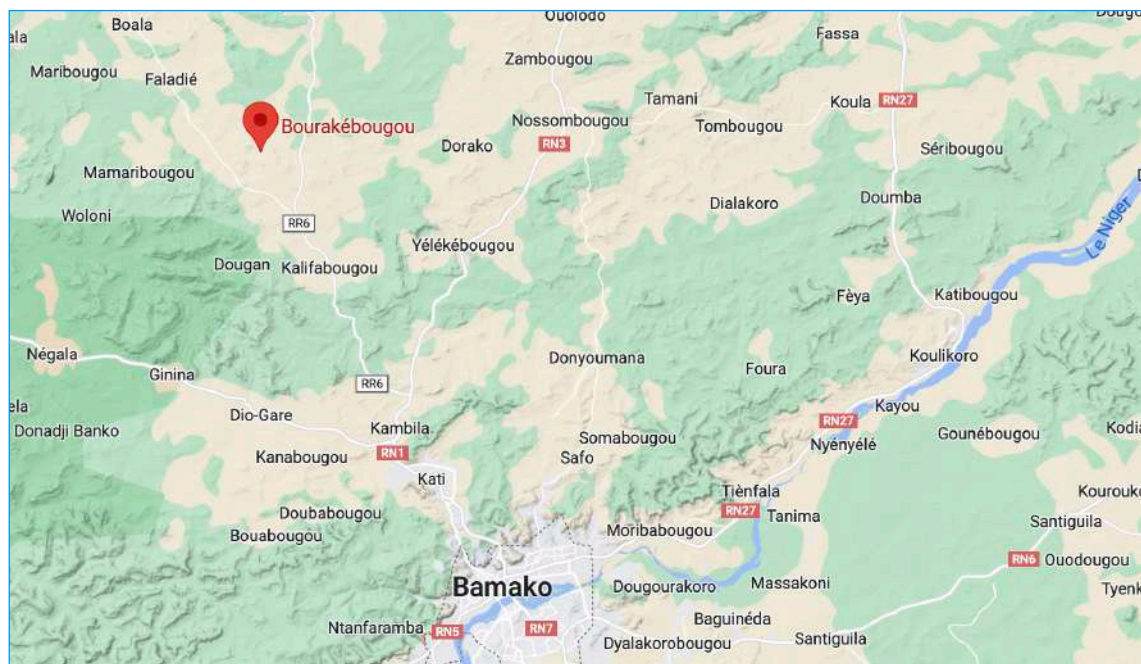


□ Exploration

- Des stratégies, des guides d'exploration se développent (*suite*) :
 - Focus : cratons granitiques et leurs couvertures sédimentaires av. des structures de piégeage; couvertures souvent marquées par des dépressions avec fuites d'H₂
 - Focus : zones de rift intra-cratoniques
- Manque de données de forages dédiés
- Besoin évident de campagnes de forages d'exploration
 - Tout début de l'exploration d'H₂ natif, comme au début du pétrole fin 19ème-début 20ème siècle, mais avec des différences majeures !

❑ Production et Exploration, l'exemple du Mali

- Le seul gisement d'hydrogène exploité au monde, à Bourakébougou, village à ≈ 60 km au NNO de Bamako
 - *Découverte complètement fortuite lors d'un forage d'eau en 1987*
- Forage profond de 112 m. Depuis 11 ans, produit $1300 \text{ m}^3/\text{j}$ de gaz à 98 % d' H_2 , 2% de N_2 et CH_4 , à P constante de 4 bars ($468 \text{ kg/j} \Rightarrow 171 \text{ T/an}$)
 - *Données $\Rightarrow$ flux continu d' H_2 renouvelé, au lieu d'un réservoir qui se vidangerait*
- L' H_2 sert à produire l'électricité renouvelable et décarbonée du village



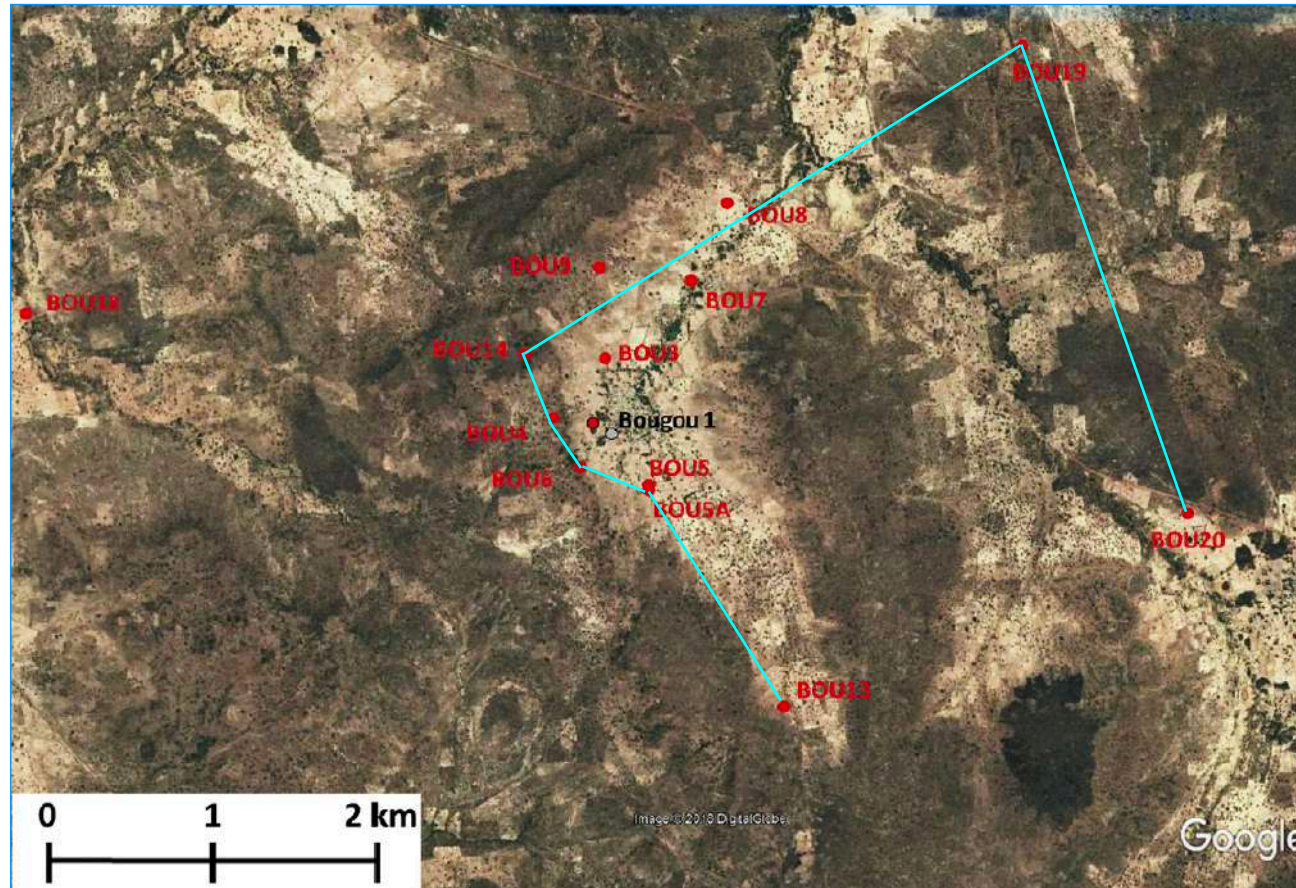
Localisation de Bourakébougou



Production d'électricité de Bourakébougou

□ Production et Exploration, l'exemple du Mali

Forages d'exploration de 2018

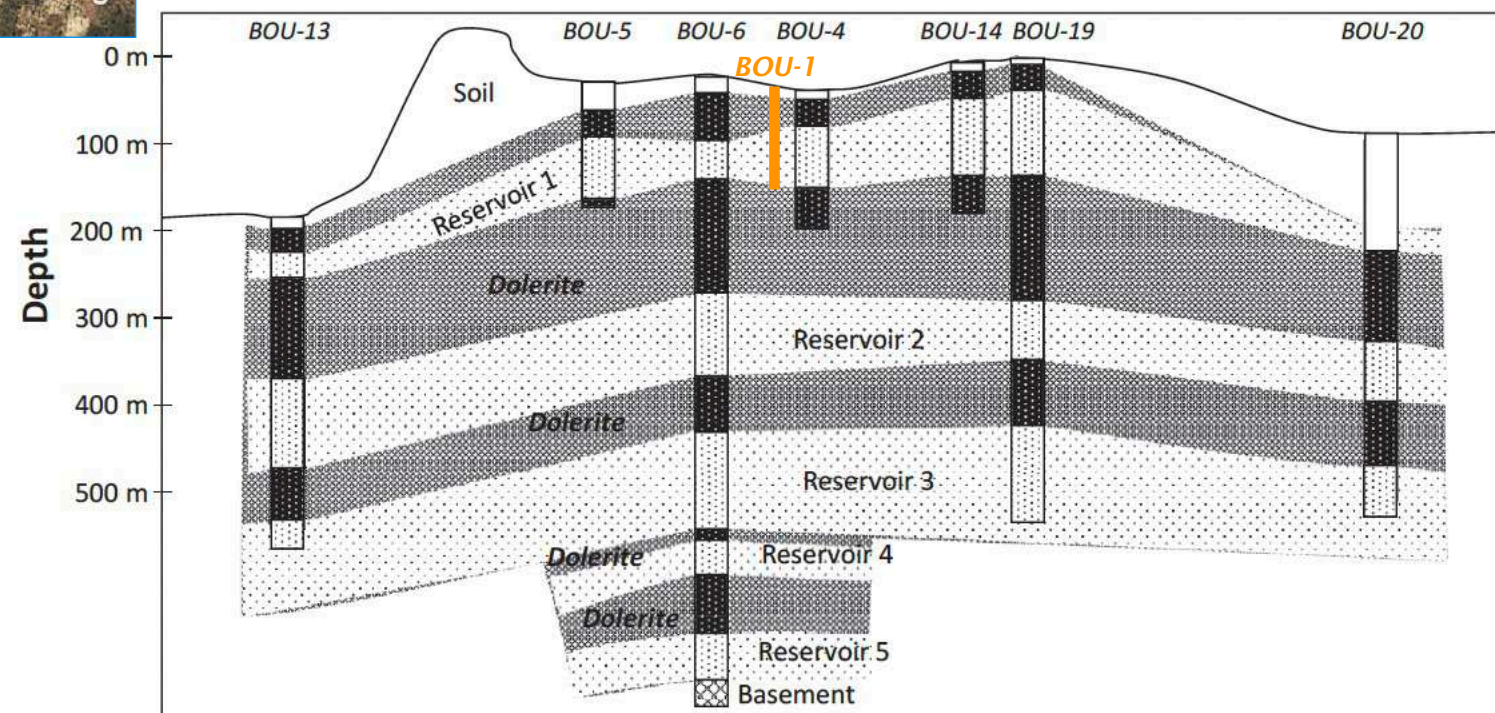


○ Exploration bien après la découverte fortuite :

- 2018 : 12 forages d'exploration de 105 à 1807 m de profondeur, au socle granitique précambrien
- 2022 : Forages d'exploration supplémentaires peu profonds

- Identification de 5 niveaux de réservoirs carbonatés karstiques précambriens avec couverture de sills de dolérite du Trias
- Forages de 2022 : présence d'H₂ à 95% de concentration avec trace d'He
- Forages de 2018 re-testés : présence d'H₂ confirmée dans les 5 niveaux de réservoir

Coupe géologique simplifiée



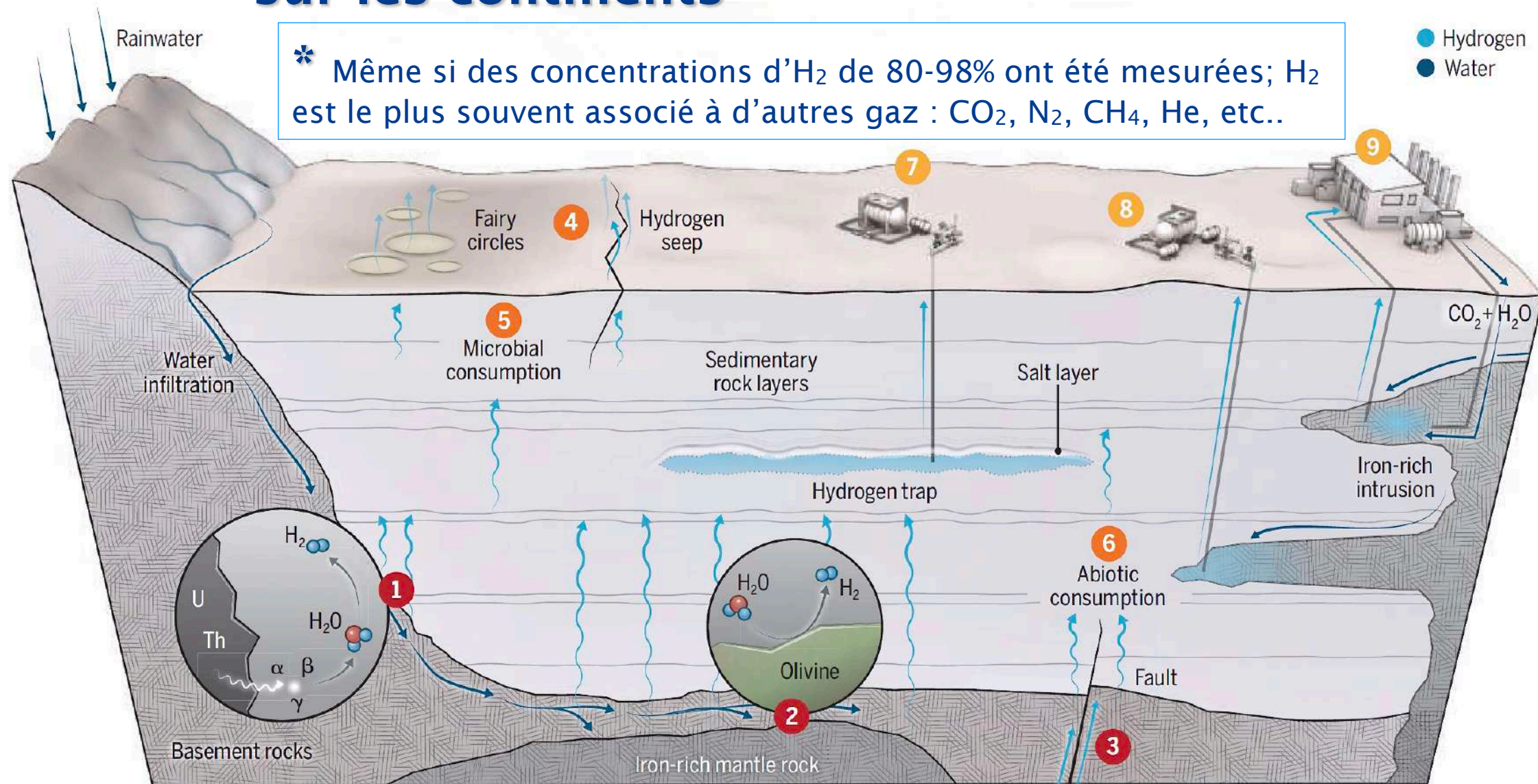


□ Production et Exploration, l'exemple du Mali

- Sur la base des 30 forages d'exploration, la ressource exploitable estimée de ce gisement d'hydrogène serait de : 60 Gm³ soit 5,4 MT
- Cette ressource est de plus renouvelable
- L'intégration de toutes les données et l'installation de puits de production ouvriraient la voie à une exploitation d'hydrogène conséquente

□ Résumé schématique du Système Hydrogène * sur les continents

* Même si des concentrations d'H₂ de 80-98% ont été mesurées; H₂ est le plus souvent associé à d'autres gaz : CO₂, N₂, CH₄, He, etc..



1: Radiolyse

2: Serpentinisation

3: Manteau et noyau

4: Emanations

5: Pertes (*Activités microbiennes*)

6: Pertes (*Réactions géochimiques abiotiques*)

7: Extraction de réservoirs

8: Extraction en roches mères

9: Production/extraction stimulées



❑ Chercheuses, chercheurs

- Nombreux, très en pointe au niveau mondial, av. publications majeures
 - *Valentine Combaudon, Eric Deville, Frédéric-Victor Donzé, Camille Dusséaux, Eric Gaucher, Julia Guélard, Nicolas Lefeuvre, Dan Levy, Isabelle Moretti, Nicolas Pélissier, Alain Prinzhofer, Christophe Rigollet, Laurent Truche, Viacheslav Zgonnik...*

❑ Universités

- Nombreux laboratoires souvent associés au CNRS
 - *Aix-Marseille, Bordeaux, Franche-Comté, Grenoble, IPG, Lorraine, Montpellier, Orléans, Paris, Pau, Rennes, Savoie Mont-Blanc, Toulouse...*
- **UPPA - E2S** : Consortium de recherche pour des Solutions R&D pour l'Energie et l'Environnement
 - *3 thésards, 3 post-doctorants sur l'H₂ natif encadrés par Isabelle Moretti*



❑ Etablissements publics de recherche

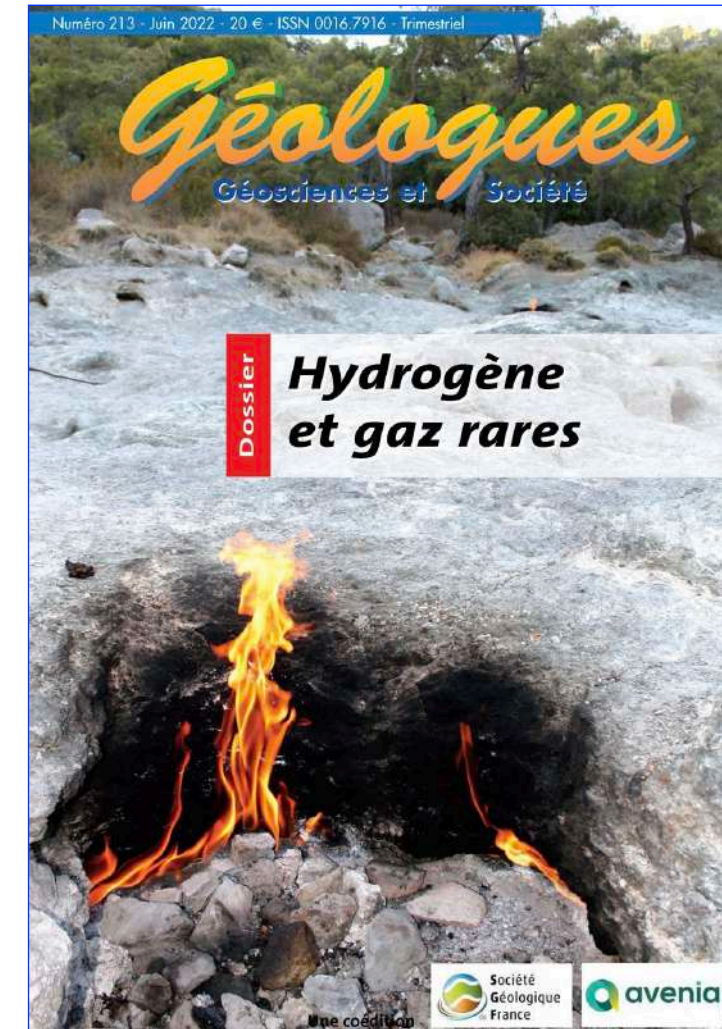
- BRGM, CNRS, IFPEN, IFREMER, INERIS
 - *Programmes diversifiés de recherche sur l'hydrogène*

❑ Conférences, Revues, Règlementation

- Octobre 2019, Colloque CNRS : Hydrogène (H₂) Naturel, Une Ressource Énergétique pour Demain ?
- Juin 2021, HNAT Summit, Paris : 1^{er} sommet international sur l'hydrogène naturel
- Juin 2021, Société Géologique de France (SGF) : *L'hydrogène naturel, état de la recherche en France*
- Juin 2022, HNAT Summit : *2^{ème} sommet international*
- Juin 2022, Revue *Géologues* de la SGF : *Dossier Hydrogène et gaz rares*
- 25 Avril 2023, EAGE-Pau, Hélioparc, Isabelle Moretti : *L'hydrogène naturel peut-il être un « game changer » ?*

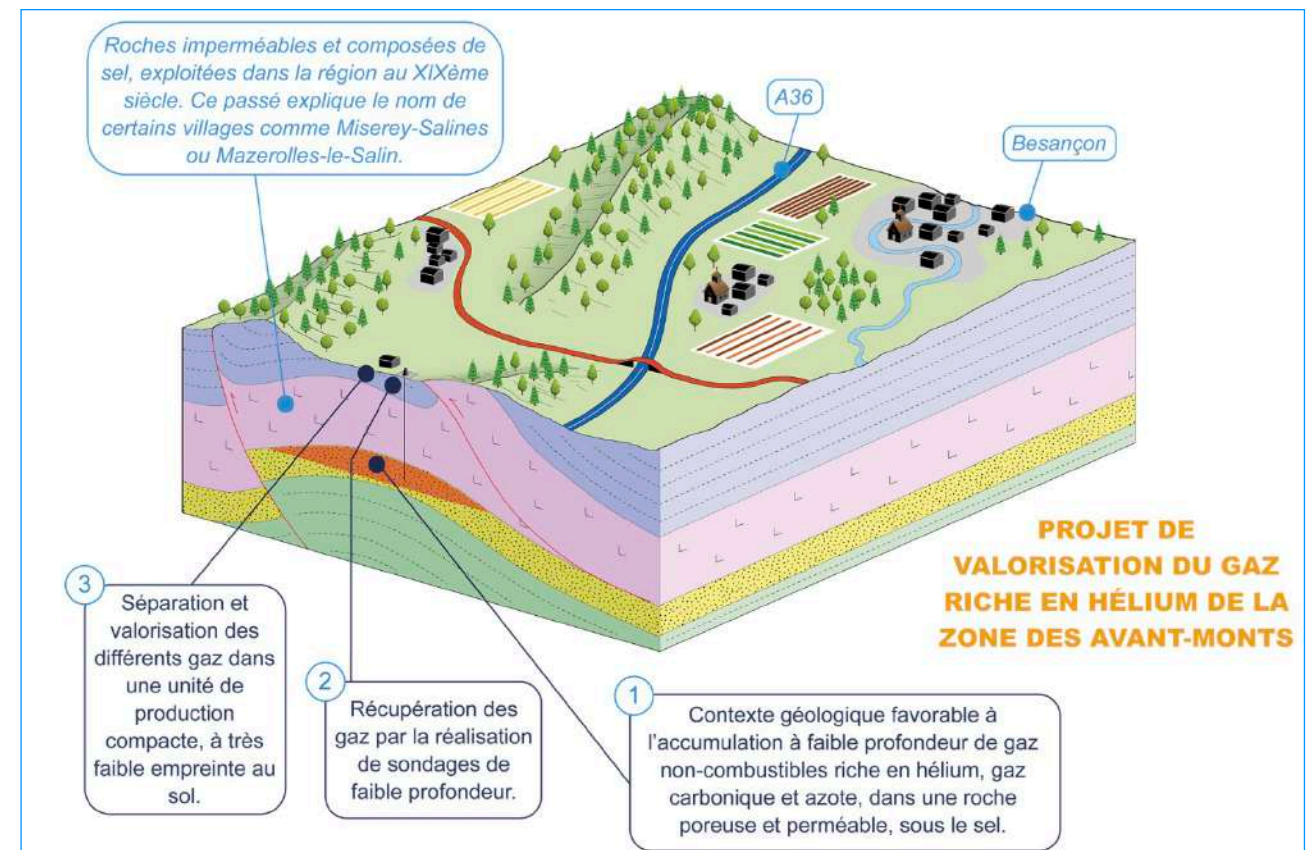
❑ Code Minier

- Avril 2022 : L'hydrogène natif ajouté au code minier



❑ Petites et moyennes entreprises en géosciences

- Actives dans les études et exploration en hydrogène naturel et hélium
 - 45-8 Energy, CVA Group, Eosys, Geolink, GEO4U, HYNAT (à Genève), TBH2 Aquitaine...
- **45-8 Energy** : approche en co-valorisation d'une production éco-responsable couplée He-H₂. Deux permis exclusifs de recherche He-H₂, en cours :
 - "Fonts Bouillants" dans la Nièvre, un 1^{er} forage d'exploration en 2022
 - "Avant-Monts Franc-Comtois" dans le Doubs
- Développé SurfMoGH₂, une sonde d'1m, détecteur d'H₂ jusqu'à 4% dans les gaz du sol, mesures au pas de 30 min pendant 1 an, une transmission des données/j





❑ Initiatives

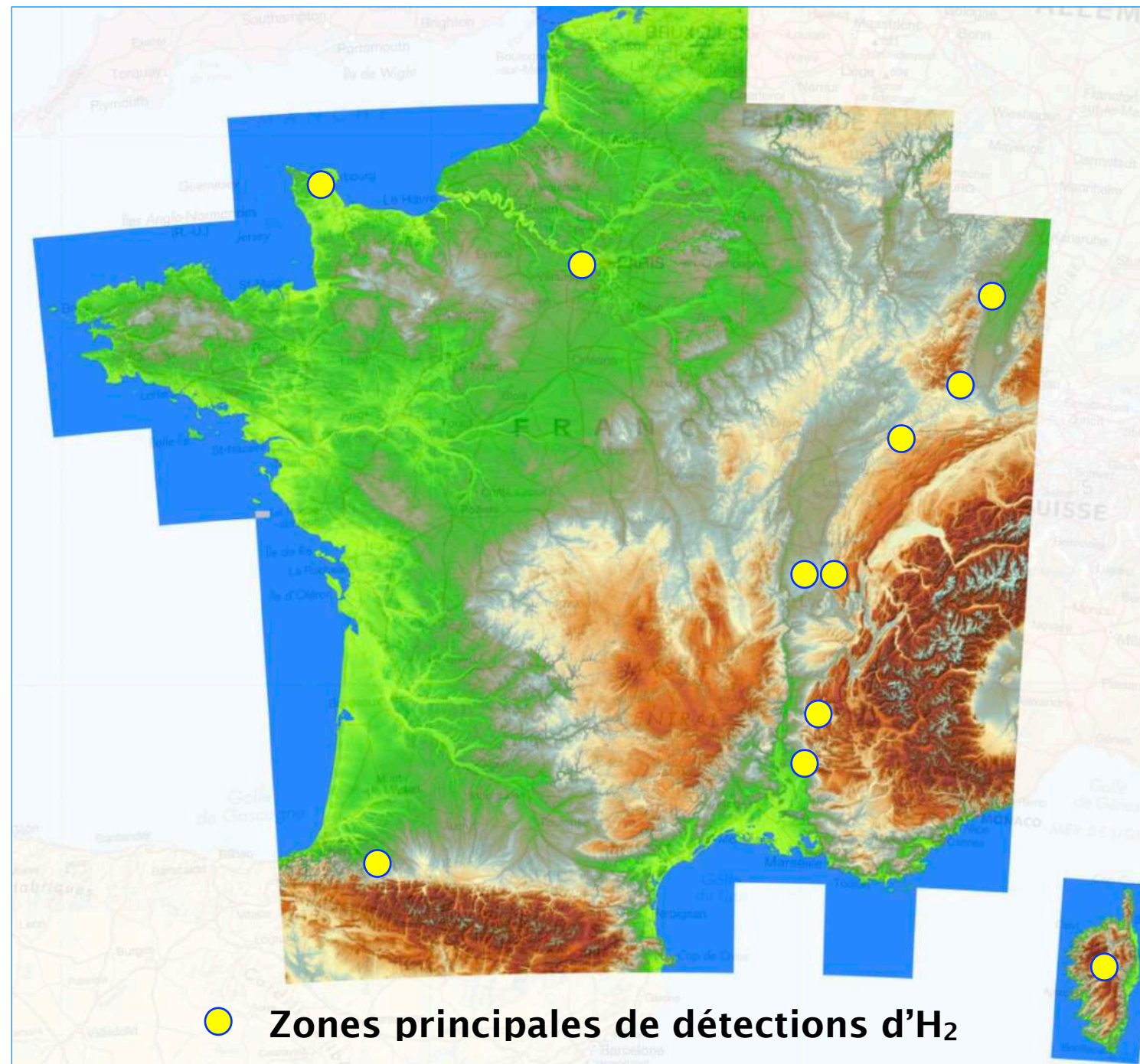
- **Earth H₂** : initiative européenne de CVA Group et 45-8 Energy, portée par le Pôle Avenia : fédérer les acteurs européens et promouvoir la filière de l'hydrogène du sous-sol (*Position Paper*, fév. 2023)
- **GdR HydroGEMM** : étude de l'H₂ naturel de la genèse à la modélisation, sous l'égide du CNRS depuis 2022, regroupe une 30^{aine} de labos, des EPICs et industriels dont l'institut Carnot ISIFor à Pau

❑ Grands groupes industriels

- **Engie** : activités de recherche; campagne de reconnaissance importante au Brésil depuis plusieurs années avec l'IFPEN et le CNRS; projet de forages en 2023-24 (?) au Brésil; communication publique
- **TotalEnergies** : suivi scientifique; activités de recherche; publications; sponsorise des études; pas de communication publique

□ Détection d'H₂

Localisation	Emanation (E) ou Puits (P)	Concentration d'H ₂
Buis les Baronnie	P	5 %
Vaux en Bugey	P	0,5 - 6 %
Cotentin (Faille de Granville)	E	>1000 ppm
Fossé Bressan	E	>1500 ppm
Fossé Rhénan (Puits de géothermie et mine)	P E	6 % 1650 ppm
Jura externe	P	2,5 %
Bassin de Paris (Puits de géothermie)	P	3 %
Pyrénées Atl.	E	>1000 ppm
Solaure en Diois	E	14 %



□ Nouvelle Calédonie

- Nombreuses émanations étudiées à terre et en mer, liées aux importants massifs ophiolitiques de l'île. Le projet de forage scientifique New Caledonia Ophiolite Land-to-Sea Drilling Project (NCDP) en attente d'approbation

❑ La Région

- 2021: la région finance le projet H2NA sur 3 ans : Evaluation du potentiel en H₂ naturel en Nlle Aquitaine
- Réalisé par CVA, 45-8 Energy, Engie et BRGM - UPPA, partenaires scientifiques
- Phases : 1) Identification de secteurs favorables à l'exploration : réalisée; 2) Caractérisation détaillée de secteurs choisis : en cours
- But final : favoriser des demandes de permis d'exploration d'H₂ naturel

En 2019, la Région crée **NEO TERRA**, feuille de route dédiée à développer des actions concrètes pour la transition énergétique et écologique
(Description du projet H2NA en p 46)



- Juin 2022: Gérard Blanchard, VP de la Région, a présenté le projet au 2ème sommet international sur l'H₂ naturel (*H-Nat Summit*)

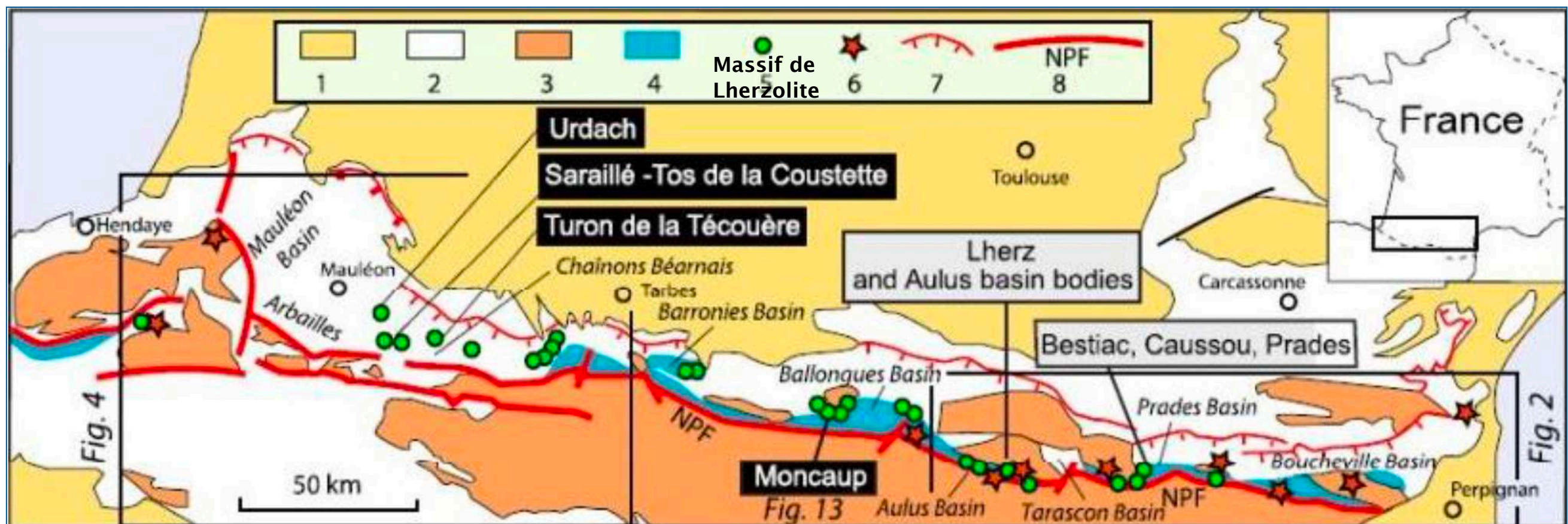
Principaux massifs de Lherzolite des Pyrénées

- Une quarantaine de massifs (dm à km) sur la chaîne
- Lambeaux de massifs de péridotite décollés/charriés des profondeurs
- Roches fraîches et altérées, serpentinisées en surface (*roches mères altérées en profondeur*)

Lherzolite fraîche et altérée



Turon de la Técoière



Focus sur le bassin de Mauléon

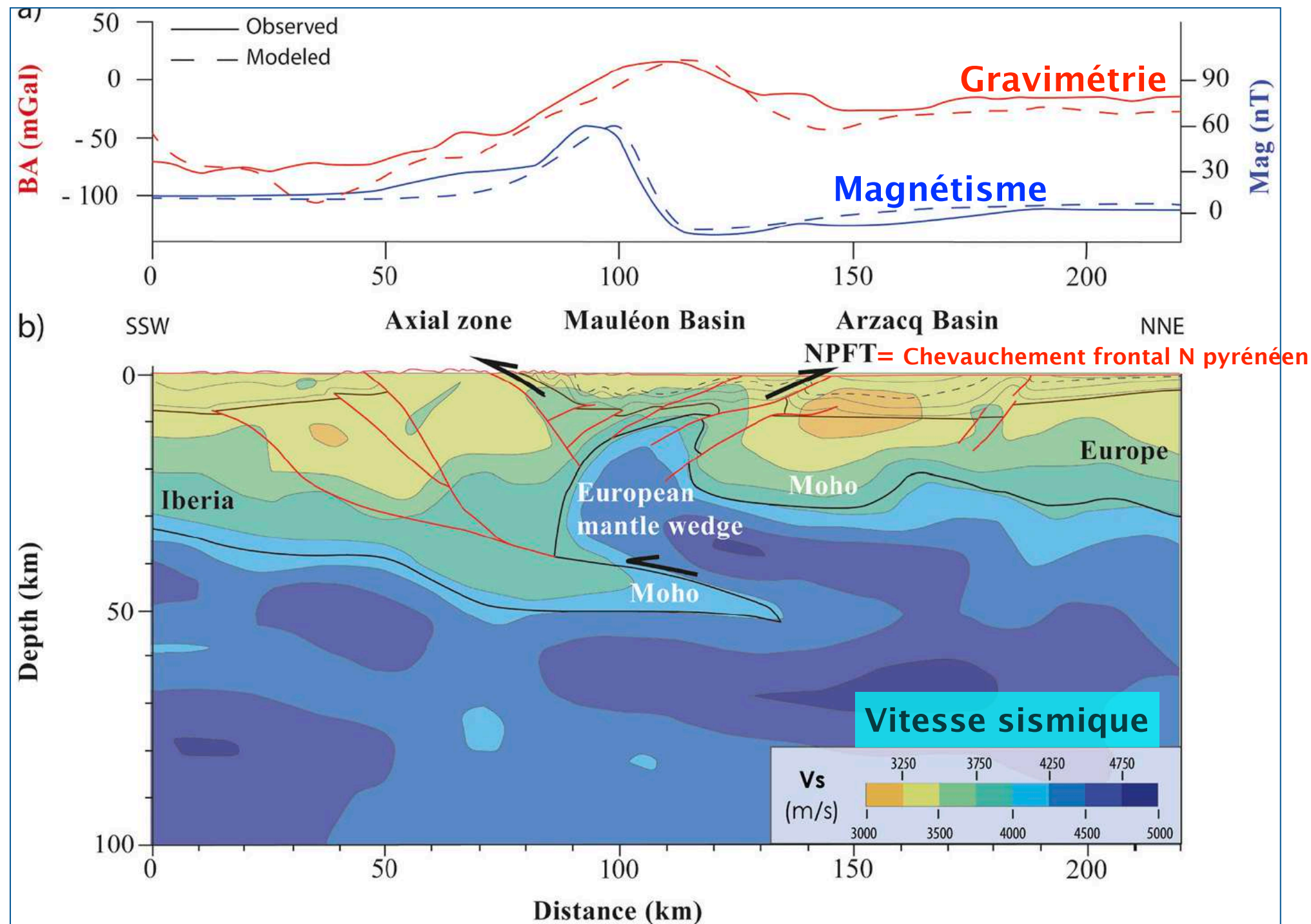
○ Étudié depuis des décennies (*Projets Convergence et Orogène, entre autres*)

○ Très fortes anomalies magnétique et gravimétrique

○ Vitesses sismiques élevées =>

○ Présence de roches denses, épaisses, av. de la magnétite, à ≈ 10 km de profondeur

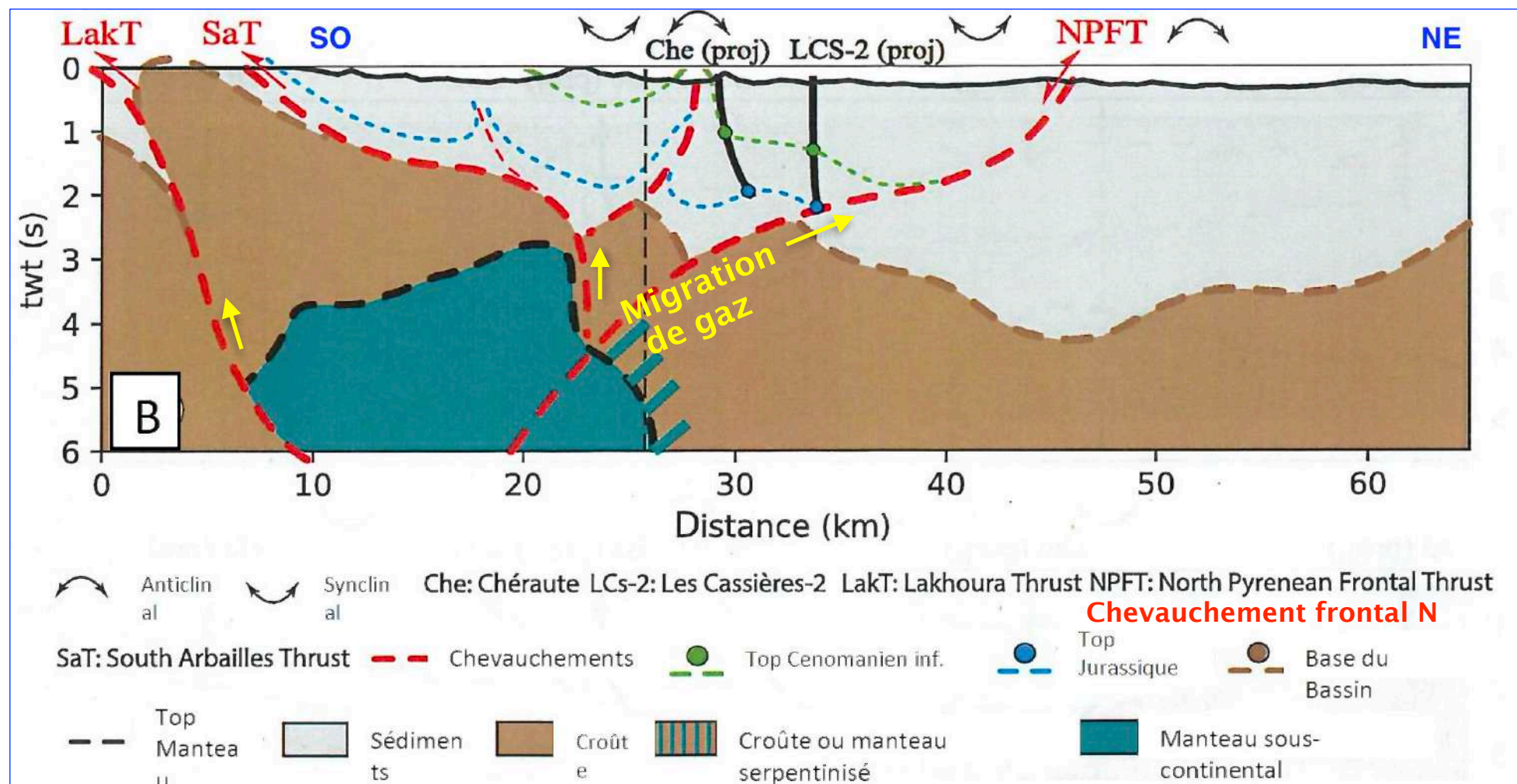
Profils sismique, gravimétrique et magnétique centré sur le bassin de Mauléon



Focus sur le bassin de Mauléon

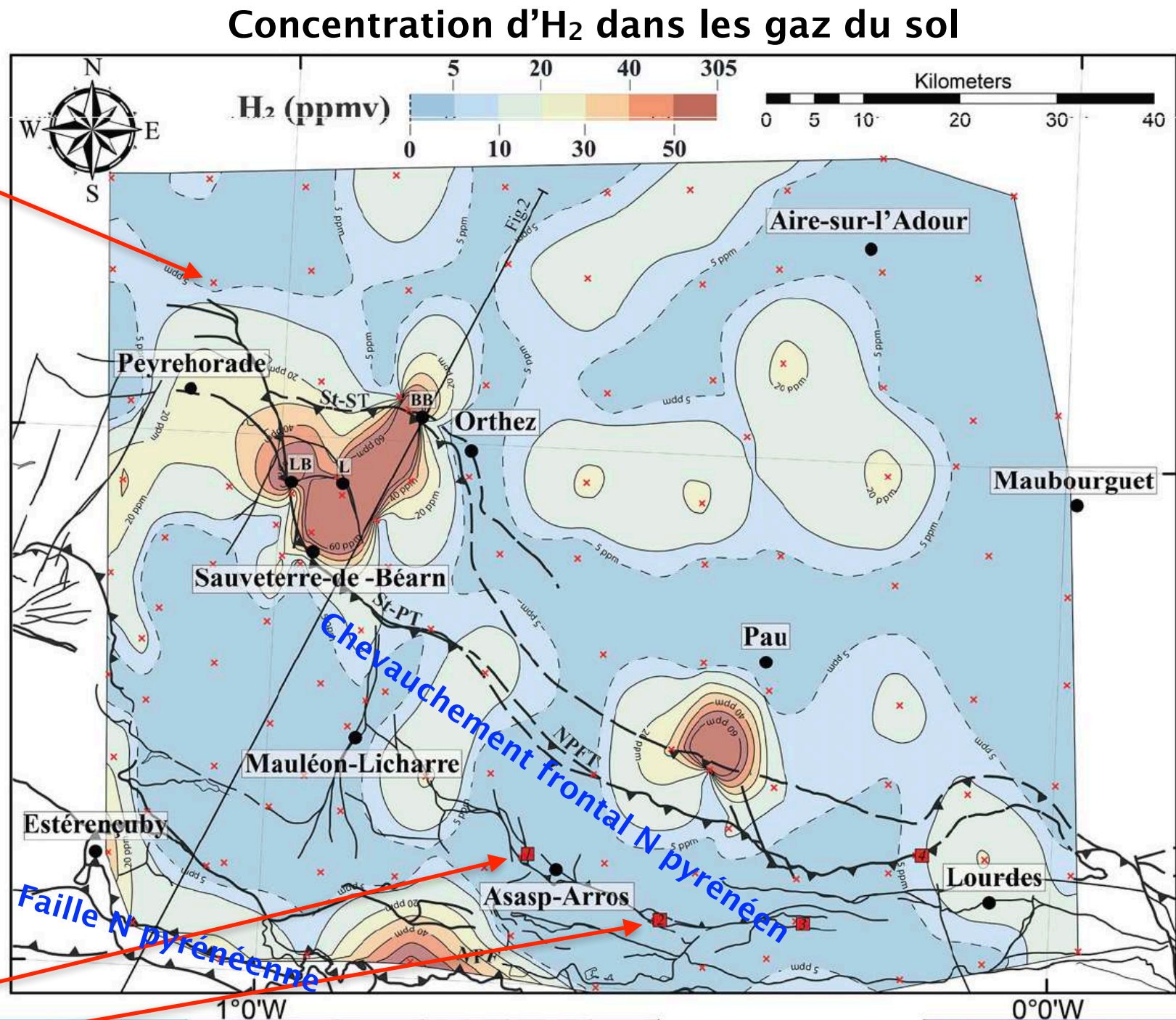
- Interprétation de l'ensemble des données sismiques, géologiques et de forages =>
- Corps mantellique de Lherzolite en conditions de P et T (200-270°C) à ≈ 10 km de prof., favorables à la serpentinisation et génération d' H_2
- Failles majeures facilitant la migration de l' H_2 et autres gaz

Interprétation géologique le long d'un profil sismique de l'Est du bassin



Etudes de 2018-21 (N. Lefeuvre)

- Vaste zone d'étude de 80x90 km; 131 pts de mesure des gaz du sol à 1m de profondeur; maillage de 10x10 km
- 1100 analyses d'H₂, CO₂, CH₄, He, ²²²Rn
- Concentrations d'H₂ les plus élevées le long de la Faille N Pyrénéenne et du Chevauchement Frontal N Pyrénéen
- Concentrations d'H₂ >1000 ppm, affleurements de Lherzolite d'Urdach et Turon de la Técoûère

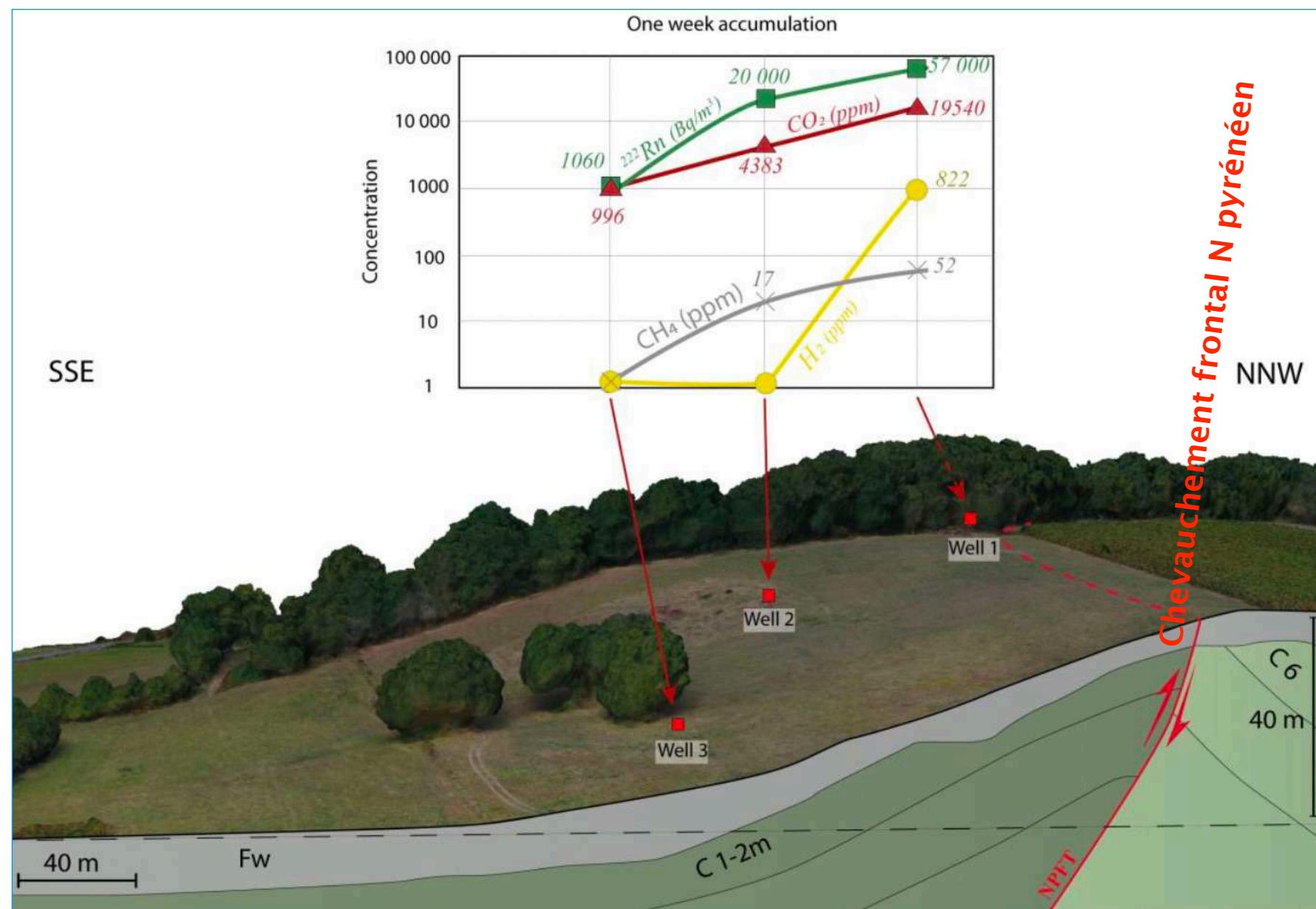


■ Etudes de 2018-21 (N. Lefeuvre)

- Etude plus détaillée à 1 km au N de Sauveterre-de-Béarn sur le Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen démontre :

- Concentrations des gaz les plus élevées sur le chevauchement
- Origines très profondes des gaz
- Migrent le long du chevauchement jusqu'à la surface
- Origine de L'H₂ du massif mantellique de Lherzolite à ≈ 10 km de profondeur

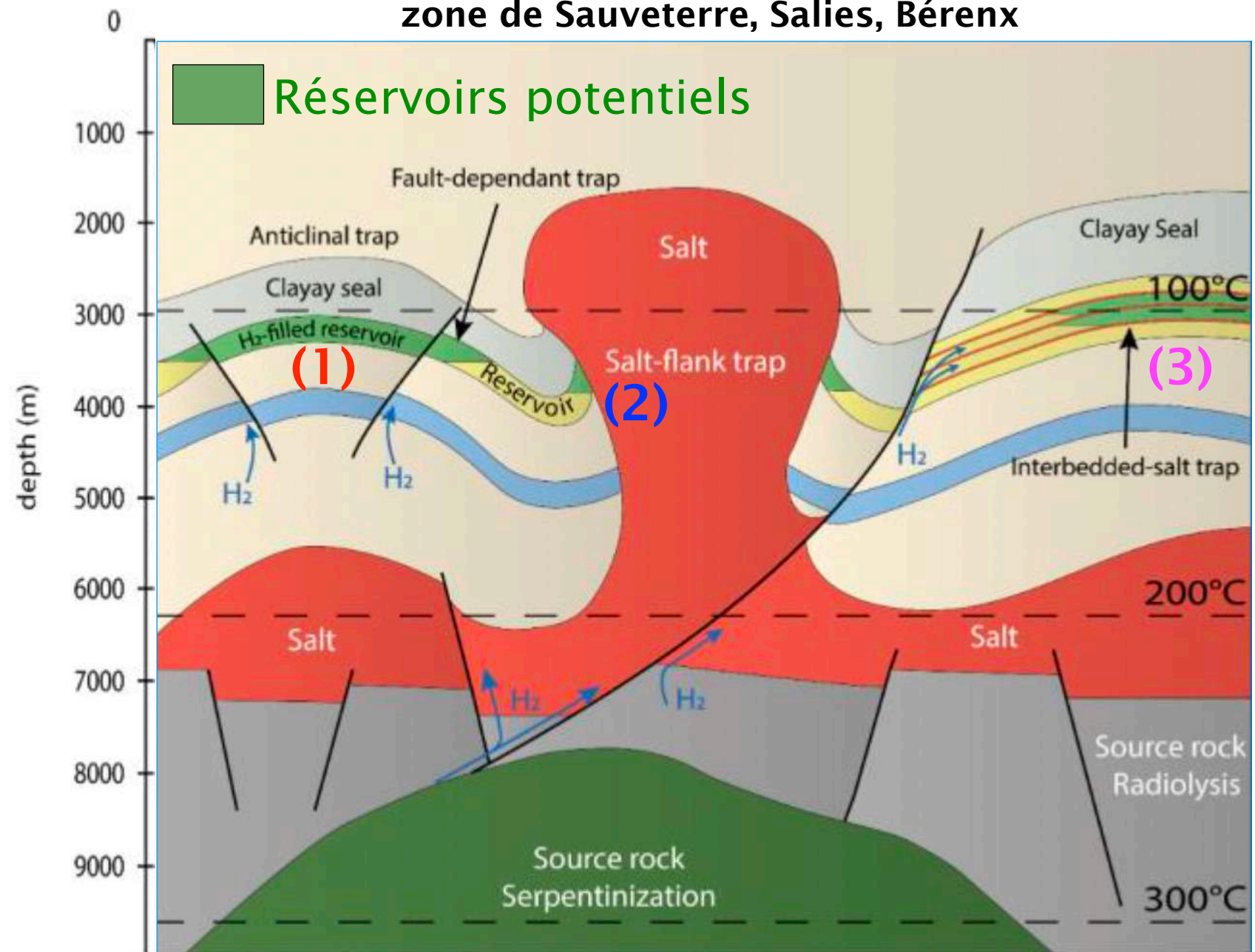
Concentrations des gaz du sol en H₂, CH₄, CO₂, ²²²Rn



Etudes de 2018-21 (N. Lefevre)

- Conditions géologiques favorables au piégeage de réservoirs d'hydrogène :
- Réservoirs potentiels à 3-4000 m de profondeur; formations du Trias av. alternance couches de sel et de calcaire/dolomie (1-10% de porosité)
- (1) Anticlinal de Sauveterre; couverture argileuse
- (2) Flancs du diapir de sel de Salies; couverture du dôme de sel
- (3) Anticlinal de Bérenx; couverture argileuse

Schéma simplifié des conditions de piégeage, zone de Sauveterre, Salies, Bérenx



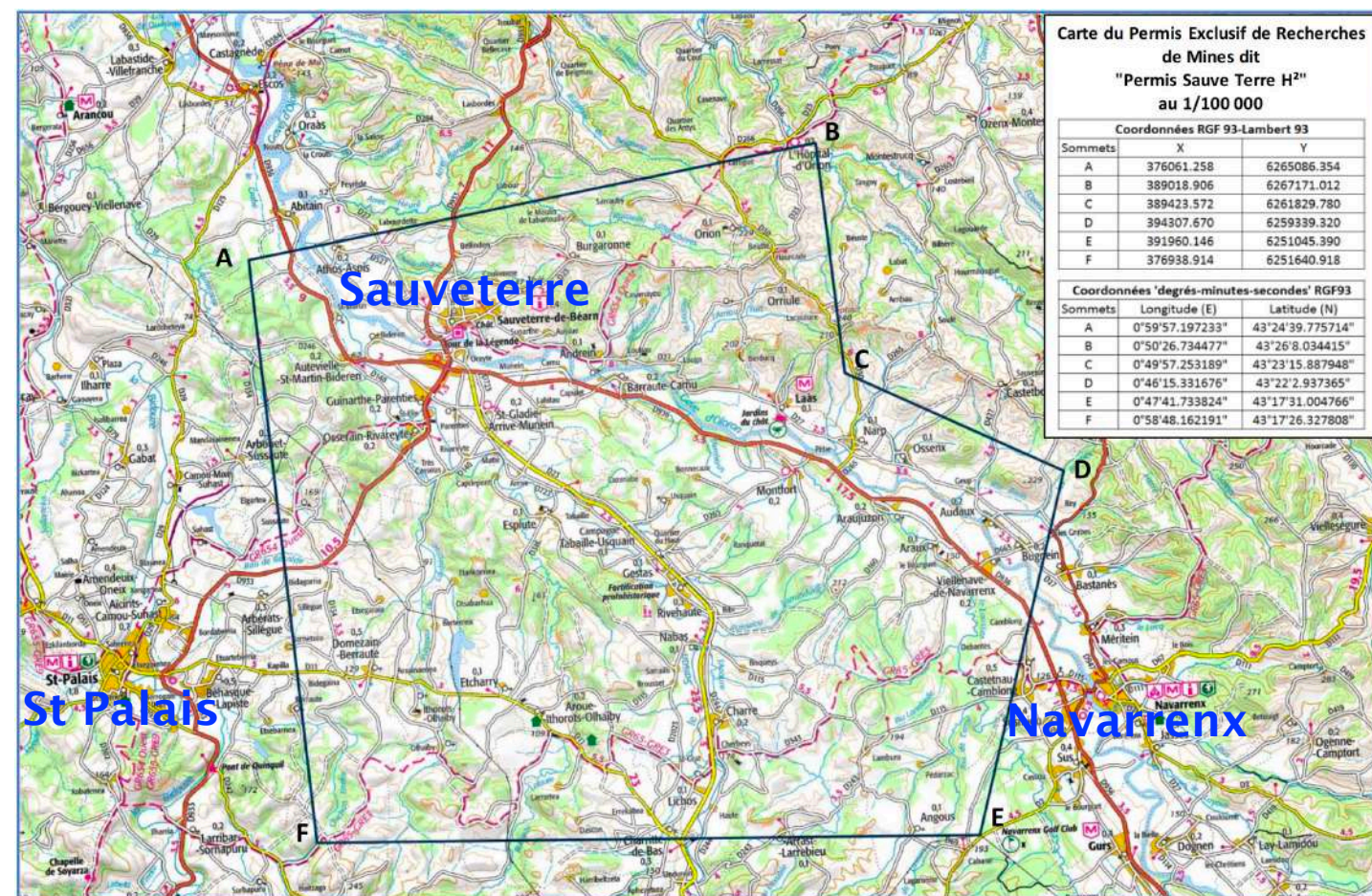
❑ Permis Exclusif de Recherche d'hydrogène natif de « Sauve Terre H² »

- Juillet 2022 : Demande de permis de 5 ans de recherche d'hydrogène natif, d'hélium et substances connexes déposé par l'entreprise TBH2 Aquitaine, basée à Pau
- Zone de 226 km² autour de Sauveterre-de-Béarn, entre Béarn et Pays Basque



Périmètre du permis

- Programme : Analyses ponctuelles et suivi en continu des gaz du sol; sismique passive sur 6 mois; relevés gravimétrique et magnétique;
- Sismique réflexion; sismique haute résolution (optionnel) et forage d'exploration (optionnel)





❑ Mali

- Exploration et production en cours (*évoquées précédemment*)

❑ Djibouti

- Contexte de rift intra-cratonique; études de surface de l'Office Djiboutien de Développement de l'Energie Géothermique avec l'UPPA, IFPEN et CVA => plusieurs sites avec un potentiel en H₂ et He
 - *Co-valorisation possible ressources géothermiques-H₂ et He*

❑ Namibie

- Contexte de formations de fer rubanées; mesures par l'UPPA d'émanations d'hydrogène ponctuelles et dans le temps dans des "ronds de sorcières" (*Résultats comparables à ceux du Brésil*)

❑ Afrique du Sud

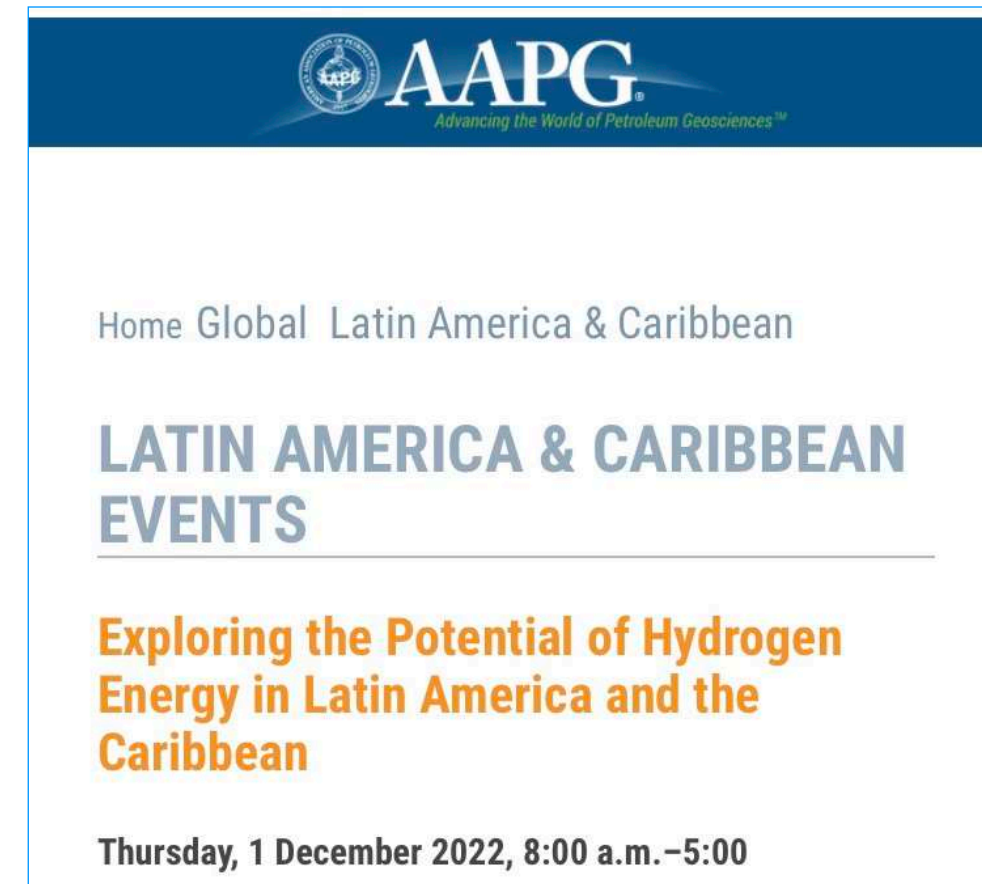
- Indices détectés, études en cours

❑ **Brésil**

- Etudes importantes en cours (*évoquées précédemment*)

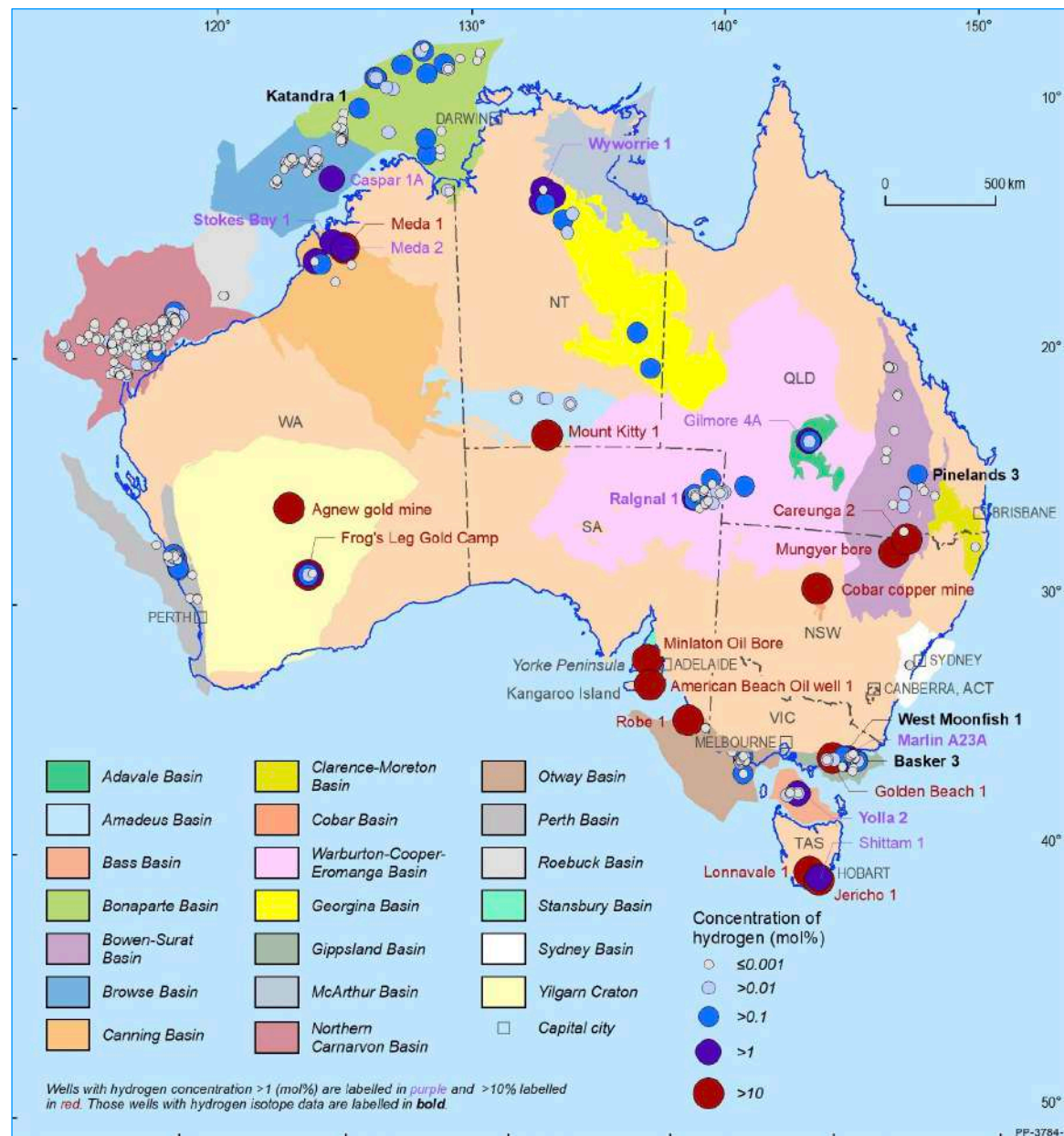
❑ **Bolivie, Colombie**

- Présentations lors d'une conférence de l'AAPG en déc. 2022
- Avancées en exploration dans les bassins sédimentaires d'avant-pays colombien
- Etudes du système hydrogène dans les ophiolites des Andes colombienne du N
- Etudes d'émanations d'hydrogène dans l'Altiplano bolivien :
 - *Article d'I. Moretti, 04/04/23 : Subduction and Hydrogen Release: The Case of Bolivian Altiplano*

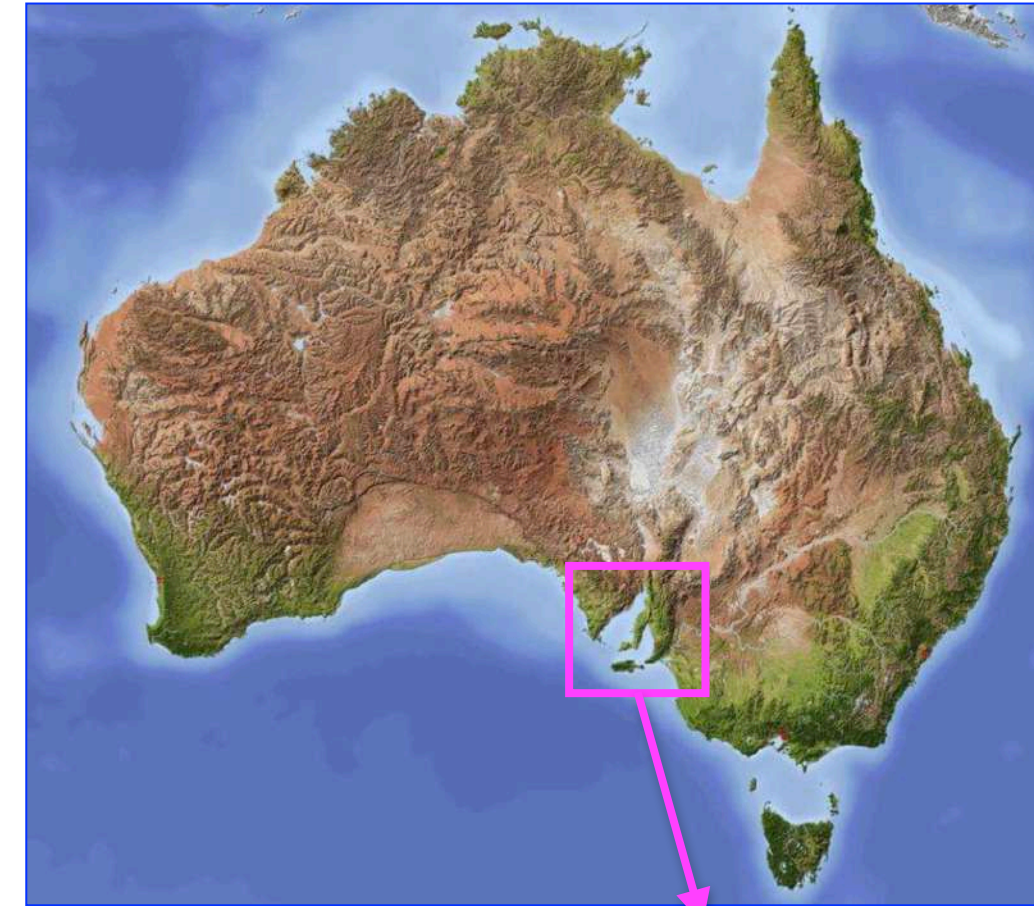


□ Australie

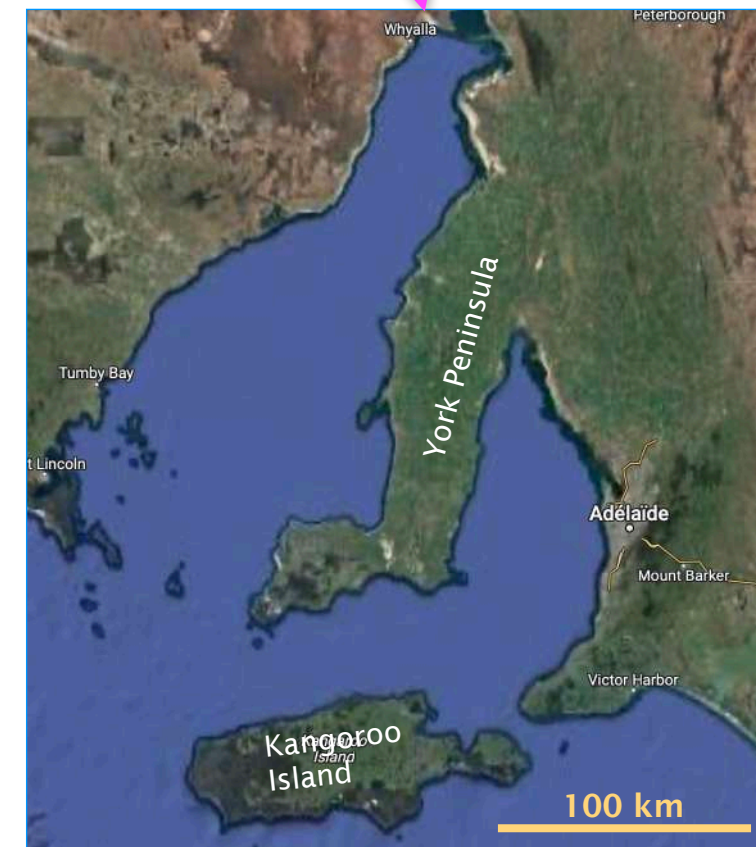
- Vaste pays/continent; nombreux contextes géologiques favorables; détections d'H₂ dans de nombreuses régions



Concentrations d'hydrogène en puits et mines



- Australie du Sud très active en exploration; > 20 permis de recherche (*Puits de 1921, jusqu'à 80% d'hydrogène sur York P. et Kangaroo I.*)





❑ Espagne

- En 1963, le puits Monzón-1, 3715 m de prof., 25% d'H₂ entre 3683-3714 m
- Réservoir de grès du Trias; couverture anticlinale de couches de sel et argile; faille de socle drainant un corps mantellique profond
- Helios Aragón active autour de Monzón à l'E de Huesca, forage en 2024 (?), production vers 2028 (*estimation de ressource de 1MT d'H₂*)

❑ Islande

- Contexte de la ride volcanique medio-atlantique à terre et point chaud islandais. Interactions basalte-eau météorique => H₂
- Fortes émissions d'H₂ dans les fumerolles (*max. de 57%*) et centrales géothermiques (*1,2 KT/an*), avec CO₂, H₂S, CH₄ et N₂

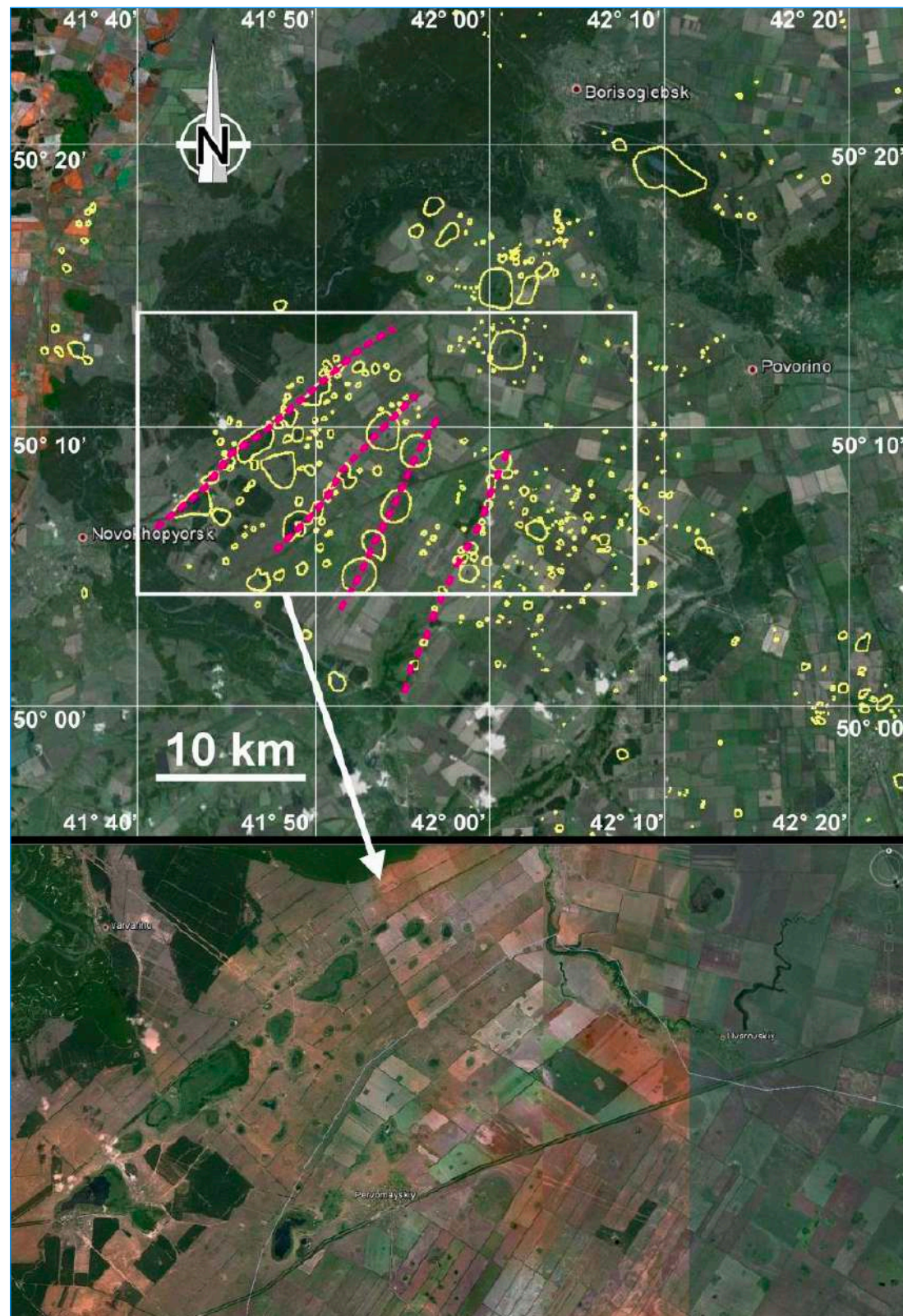
❑ Italie, Ukraine, Allemagne

- Des contextes géologiques favorables, études en cours

❑ Kosovo

- Découverte récente dans un puits de géothermie de 30 % d'H₂ dissous dans l'eau (*Co-valorisation eau chaude-hydrogène possible*)

Dépressions, région de Borisoglebsk, 600 km au S de Moscou



■ Russie

- Vaste territoire au S et SE de Moscou av. des milliers de dépressions; nombreuses mesures d'émanations d'H₂
- Contexte intracratonique, socle granitique av. couverture sédimentaire
- Création d'une nouvelle dépression; émanations d'H₂ confirmées; mort de la végétation

Nouvelle dépression, Elektrostal, E de Moscou



❑ Nebraska, 2019 : Forage exploratoire de 3000 m de profondeur (Entreprise NH2E)

- Au centre d'un cercle de fées (C'est une première)

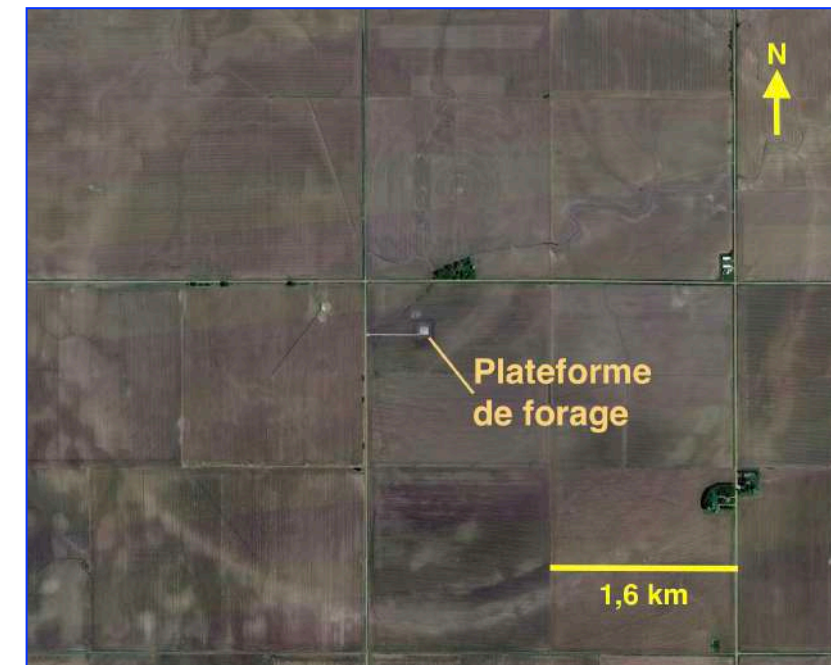
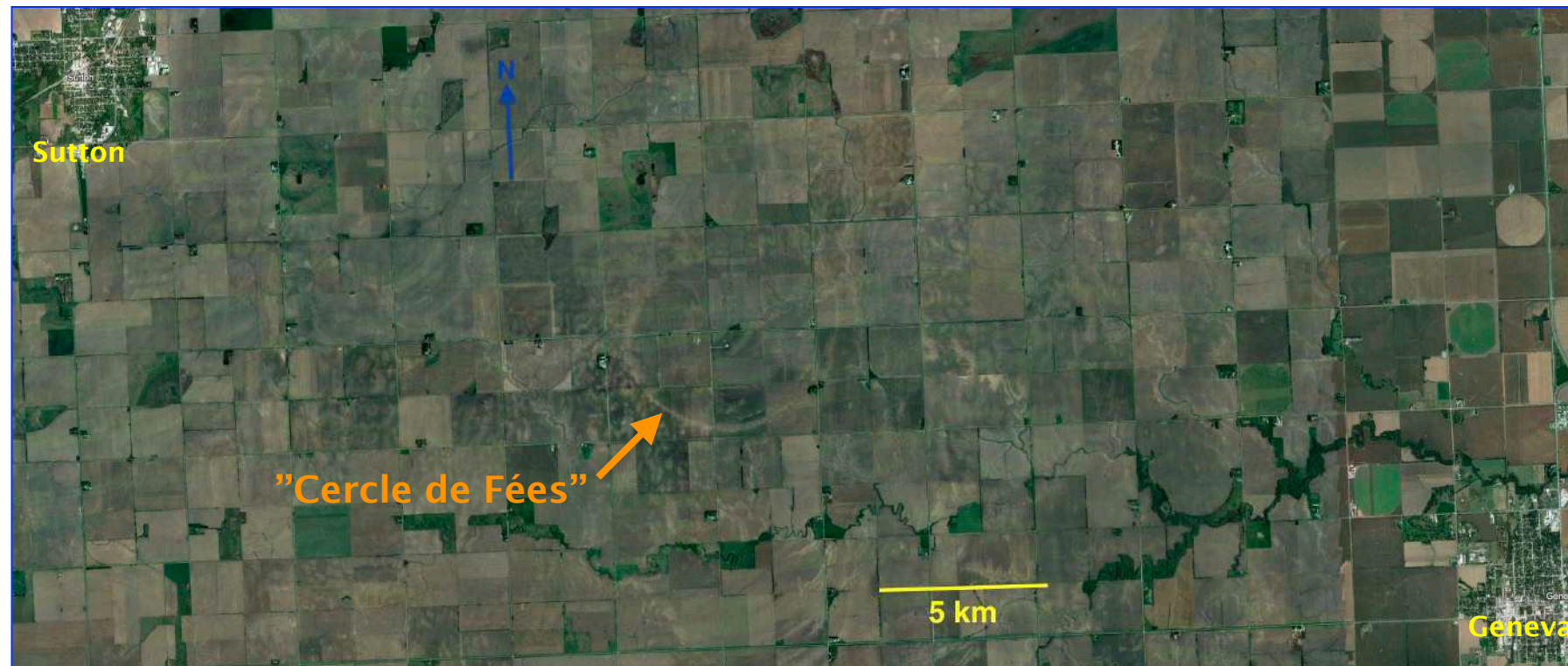
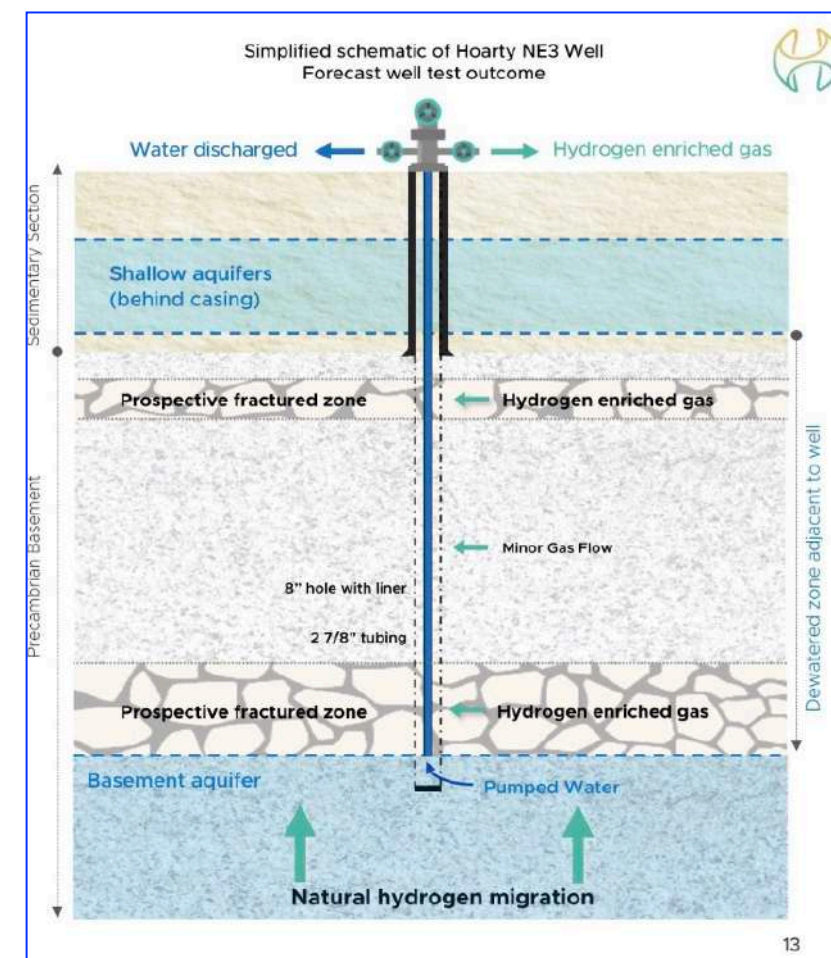


Figure 2: Hoarty NE3, the first wildcat well targeting natural hydrogen

- Détection d' H_2 dans deux zones fracturées du socle granitique
- Mars-mai 2023 : tests de débit et analyse des gaz après rabattement de l'aquifère du socle



- ◉ L'hydrogène naturel du sous-sol représente une **nouvelle énergie** primaire, renouvelable, décarbonée et potentiellement abondante
- ◉ La **France** a tous les atouts pour être à la pointe de cette nouvelle filière de la recherche, exploration et production de ressources en hydrogène natif
- ◉ La **Nouvelle Aquitaine** et les **Pyrénées Atlantiques** sont à l'avant-garde
- ◉ Cette nouvelle filière énergétique reste très peu connue; besoin de visibilité, de soutien aux niveaux gouvernemental, régional et local; et de subventions publiques, au niveau de la France, de l'Europe et du reste du monde



Merci de votre attention et participation

à bientôt, adishatz, ikus arte

