



12 février 2025  
Nancy

# H<sub>2</sub> NATUREL: un potentiel ENERGETIQUE d'avenir

Jacques PIRONON

*Directeur de Recherche émérite CNRS*

*Académicien*



# Source d'énergie primaire vs. secondaire

## Qu'est-ce que l'hydrogène ?

- C'est l'élément chimique **le plus abondant** dans l'univers : 92% en nombre d'atomes.
- Il n'existe que très rarement à l'état naturel car il est généralement combiné avec d'autres atomes : on le trouve notamment dans l'eau, le pétrole ou encore le gaz naturel. **L'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire mais une énergie chimique secondaire.** C'est pourquoi on le considère d'abord comme un **vecteur énergétique.**



Energy Observer

<https://www.energy-observer.org/fr/ressources/hydrogene>

# Une ressource primaire sous-estimée

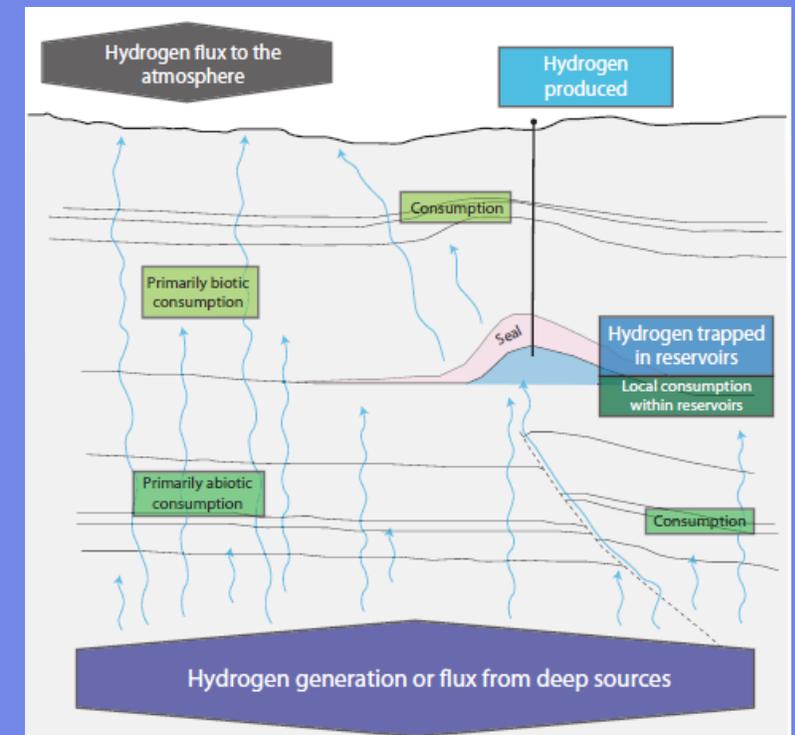


Ellis and Gelman, *Sci. Adv.* 10, eado0955 (2024) 13 December 2024

- Estimation d'une ressource potentielle en hydrogène à l'échelle du globe d'environ  $5,6 \times 10^6$  Mt.
- Une petite fraction (par exemple,  $1 \times 10^5$  Mt) fournirait l'hydrogène nécessaire pendant environ 200 ans.
- Cette quantité d'hydrogène contient plus d'énergie (environ  $1,4 \times 10^{16}$  MJ) que toutes les réserves prouvées de gaz naturel sur Terre (environ  $8,4 \times 10^{15}$  MJ).

## Modèle conceptuel des ressources géologiques en hydrogène.

Les données d'entrée du modèle comprennent la production annuelle d'hydrogène naturel, la fraction d'hydrogène retenue dans les pièges, le temps de séjour dans les réservoirs, la proportion de pertes biotiques et abiotiques et le taux de production anthropique.

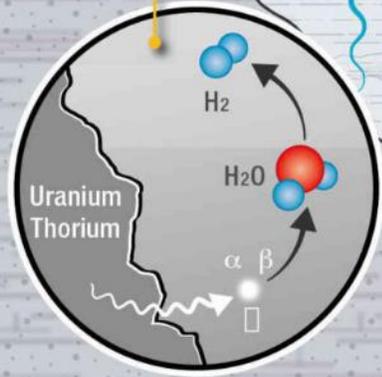


# Des usines naturelles dans nos sous-sols

Selon les experts, divers processus géologiques pourraient être à l'origine d'une production, continue ou non, de dihydrogène sous la surface.

## Par radiolyse de l'eau

En émettant des rayonnements, certains éléments radioactifs naturellement présents dans la croûte terrestre – comme l'uranium ou le thorium – provoqueraient une radiolyse de l'eau ( $H_2O$ ), qui se séparerait alors en dihydrogène ( $H_2$ ) et oxygène ( $O_2$ ).



## Par craquage

Dans des conditions de température et de pression particulières, les longues molécules de matière organique pourraient se décomposer pour engendrer notamment des molécules de dihydrogène.

## Par serpentinisation

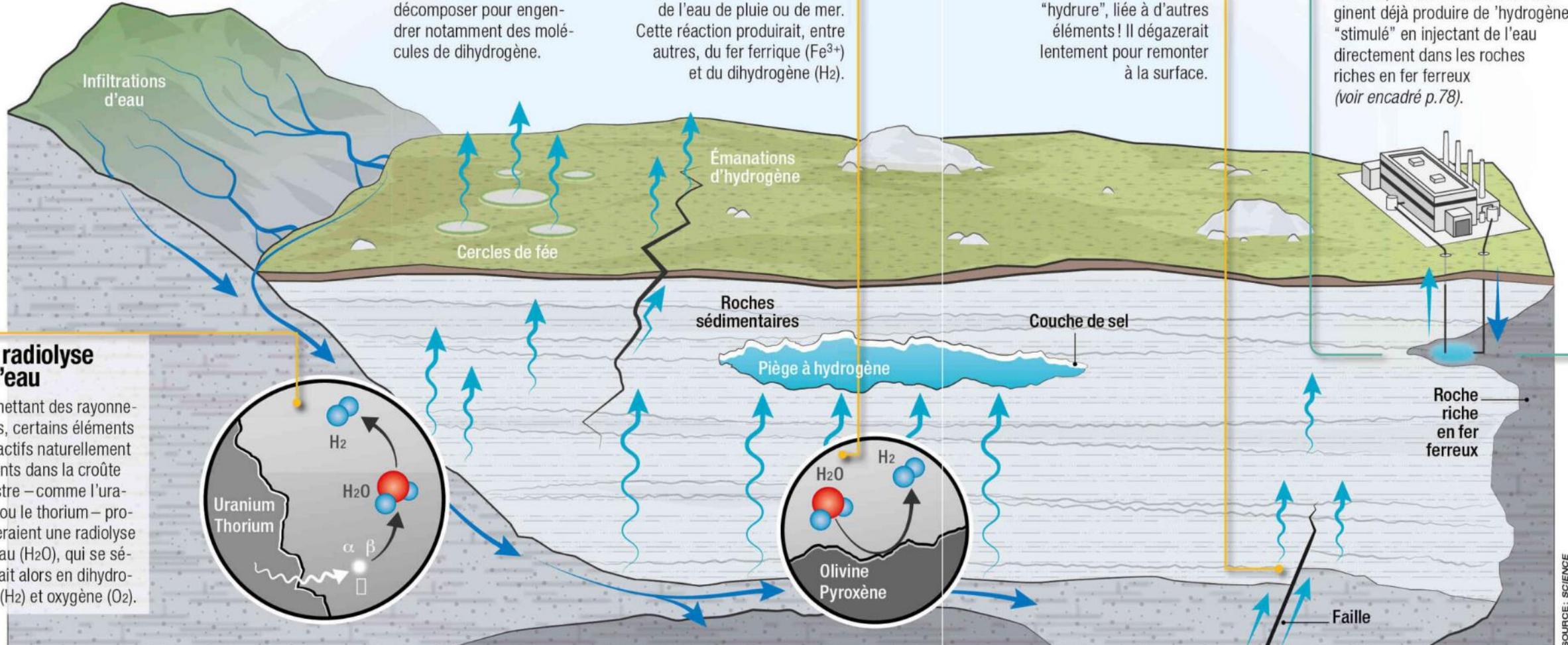
Contenu dans certains minéraux – comme l'olivine, le pyroxène... – du manteau terrestre, le fer ferreux ( $Fe^{2+}$ ) pourrait s'oxyder au contact de l'eau de pluie ou de mer. Cette réaction produirait, entre autres, du fer ferrique ( $Fe^{3+}$ ) et du dihydrogène ( $H_2$ ).

## Par diffusion

De l'hydrogène "primordial" pourrait être stocké dans le noyau de la Terre depuis sa formation, sous une forme stable appelée "hydrure", liée à d'autres éléments ! Il dégagerait lentement pour remonter à la surface.

## Il serait même possible de provoquer sa production

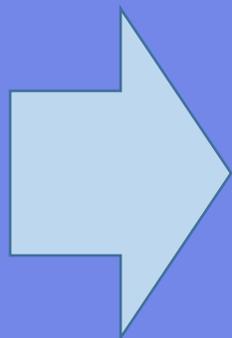
Au lieu d'attendre que la réaction se réalise naturellement en profondeur, certains chercheurs imaginent déjà produire de l'hydrogène "stimulé" en injectant de l'eau directement dans les roches riches en fer ferreux (voir encadré p.78).



# Hydrogène



Jusqu'en 2023, H<sub>2</sub> était considéré comme un vecteur énergétique du future (une **énergie secondaire**), avec les couleurs de l'arc-en-ciel!

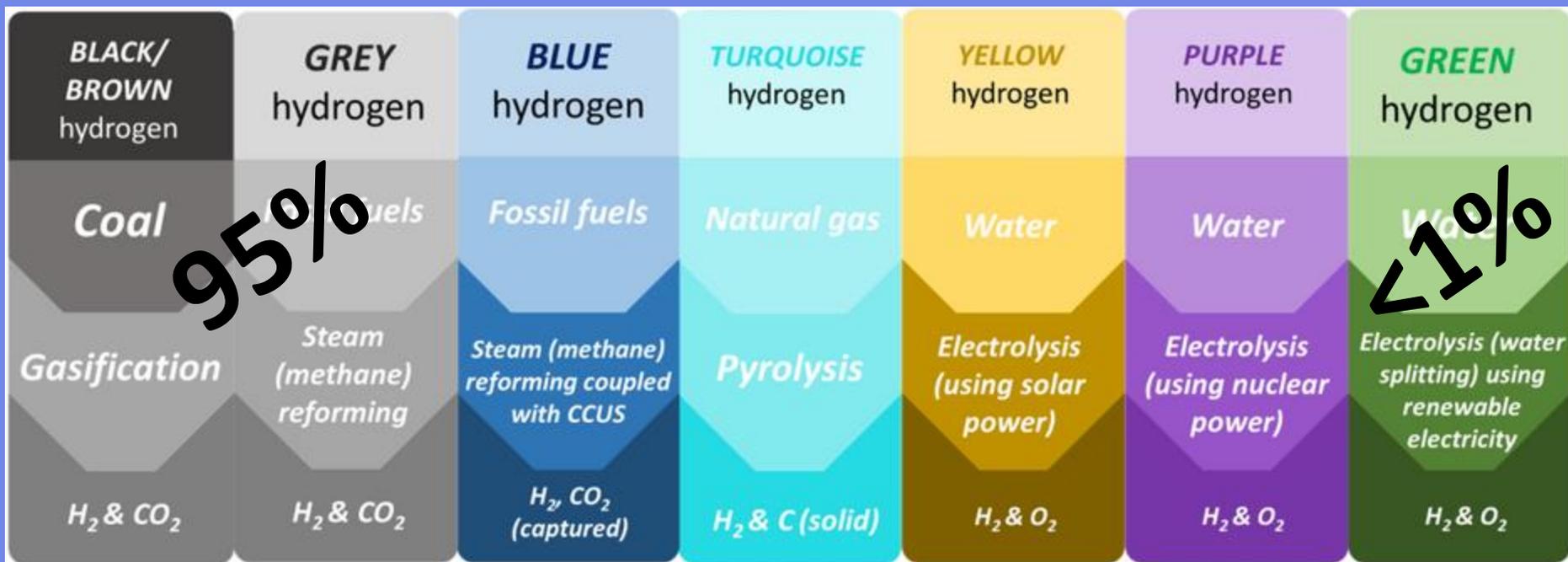


Depuis 2023, l'hydrogène « naturel ou natif » est apparu, (une **énergie primaire**), associé à la couleur blanche

<https://oxsci.org/over-the-hydrogen-rainbow/>

**WHITE**  
hydrogen

- Extracted from deep geological formations
- Potentially renewable



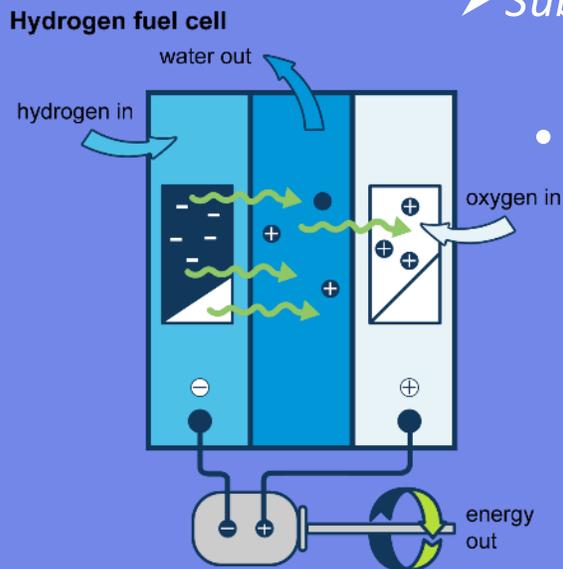
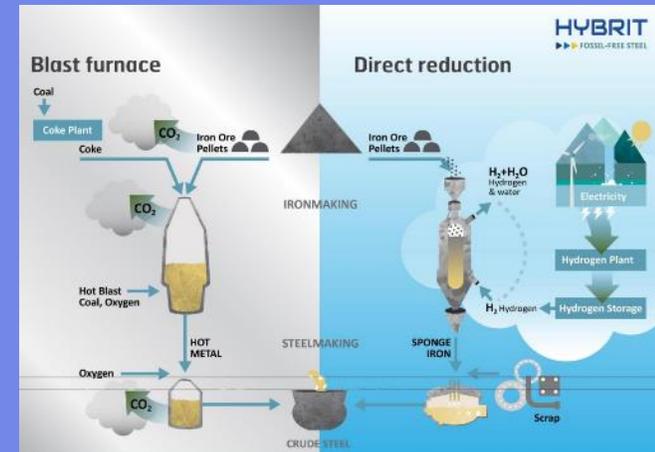
# Les principaux usages de l'hydrogène

- **Décarboner la mobilité en assurant un transport vert**
  - *Mobilité lourde (camions, trains, engins) / piles à hydrogène*
  - *Mobilité légère / moteurs thermiques à hydrogène*
  - *Aviation / piles à combustible ou turboréacteurs*



- **Décarboner l'acier dans les usines sidérurgiques de la région**

➢ *Substitution du charbon par de l'hydrogène*



- **Décarboner l'agriculture**

➢ *Produire des engrais sans émettre du CO<sub>2</sub>*

- **Produire une électricité verte à partir d'hydrogène**

*Production d'électricité par piles à combustible: l'hydrogène réagit avec l'oxygène dans une cellule électrochimique, semblable à une batterie, pour produire de l'électricité, de l'eau et de petites quantités de chaleur.*

# Infrastructures

- La transition hydrogène impose de **construire de nouveaux pipes** et convertir les pipes existants de gaz naturel en pipes H<sub>2</sub>
- **Réseau gazier** avec opérateurs nationaux et locaux
- **Sites de stockage** en surface et souterrains

## mosaHYc (Moselle Sarre HYdrogène Conversion)

- La capacité maximale d'injection du réseau sera de **75 000 m<sup>3</sup>/h d'hydrogène**
- Sur les 100 km du **futur réseau** mosaHYc en 2026, 80 seront convertis.

Source : European Hydrogen Backbone initiative 2020



# L'hydrogène blanc en Lorraine

## Une aventure humaine... aussi

- **Jacques PIRONON**

Directeur de recherche au CNRS. Spécialiste des fluides géologiques en milieu sédimentaire, Fondateur en 2011 du Laboratoire de Recherche GeoRessources du CNRS et de l'Université de Lorraine.



- **Philippe de DONATO**

Directeur de recherche au CNRS. Spécialiste en physico-chimie, il mène des projets de recherche sur le transfert de fluides entre le sous-sol, la biosphère et la troposphère et le bilan carbone.



**Sans oublier** : Julien MOULIN (FDE), Antoine FORCINAL (FDE), Fady NASSIF (FDE), Médéric PIEDEVACHE (Solexperts), Thomas FIERZ (Solexperts), Odile BARRES (CNRS), Aurélien RANDI (CNRS), Marie-Camille CAUMON (UL), Mathieu LAZERGES (UL), Michel DESHAIES (UL), Marie-France AGNOLETTI (UL), Pascal RAGGI (UL), les doctorants et post-doctorants, ingénieurs et techniciens...

# Sérendipité... sans le savoir

- La sérendipité est **le fait de faire par hasard une découverte inattendue qui s'avère ensuite fructueuse**, notamment dans le domaine des sciences.

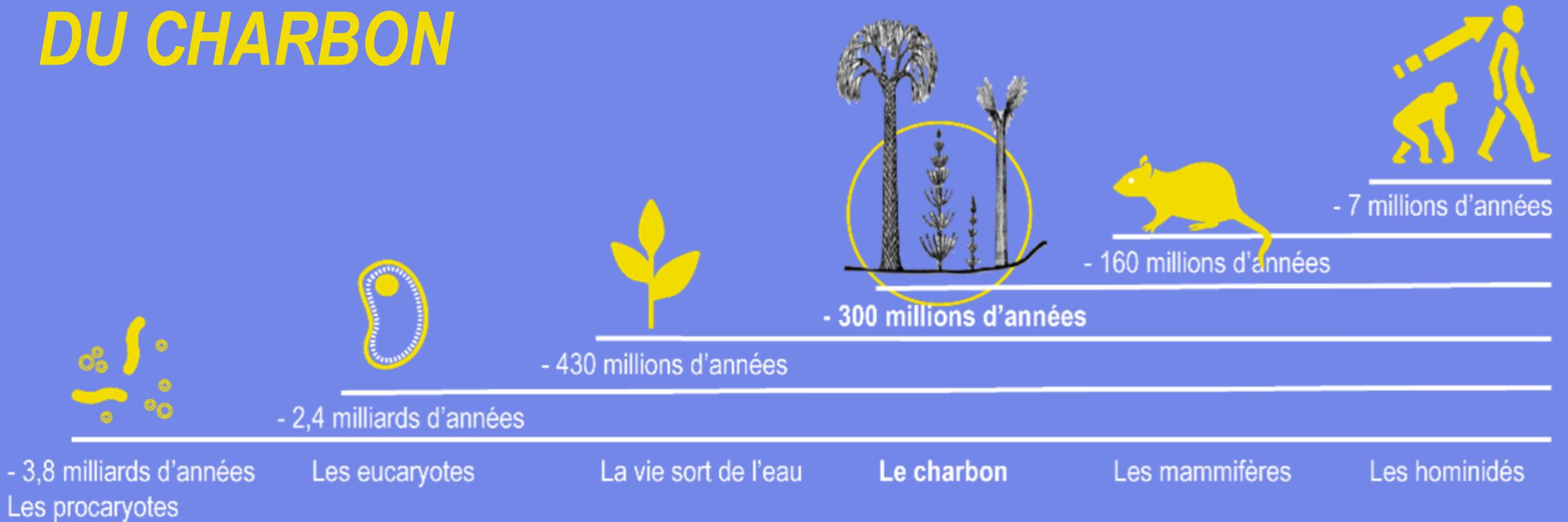
Et notre hydrogène, il est « serendip » ?



Le Figaro, Régis Faller

*Lorsque le hasard fait bien les choses, c'est plus chic de l'appeler sérendipité...*

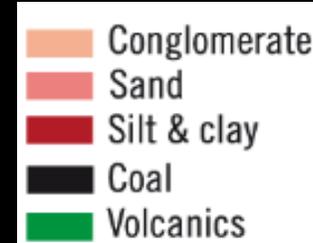
# PETITE HISTOIRE DU CHARBON





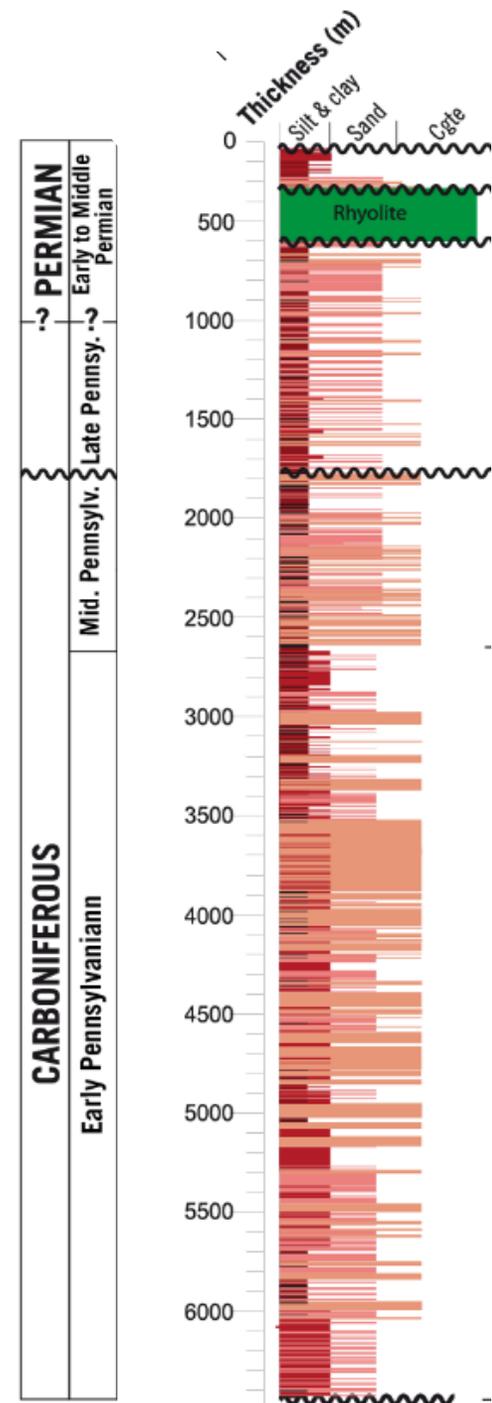
## **Aux origines du charbon**

Il y a plus de 300 millions d'années, durant la période du Carbonifère, la Lorraine et la Sarre se trouvaient dans une chaîne de montagnes qui abritait un paysage de fleuves et de lacs bordés d'une forêt luxuriante périodiquement inondée.



# LE CARBONIFERE

*Des séquences fluvio-lacustres répétitives avec plus de 100 couches de charbon*



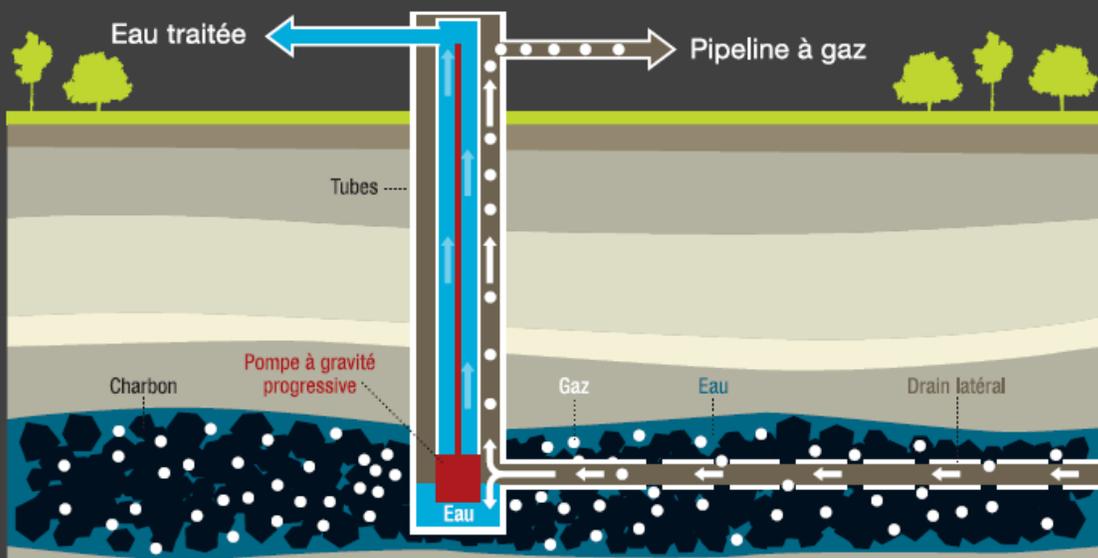
# REGALOR: REssources GAZIères de LORraine



*un projet industriel  
qui interpelle  
les scientifiques*

## Un projet universitaire les acteurs clés

### Production du gaz de charbon



1. Baisse de la pression dans la veine de charbon par pompage d'eau
2. Libération du gaz une fois la pression suffisamment basse
3. Remontée du gaz par le tubage

*Soutenu par :*

- l'**Etat** (Pacte Lorraine)
- la région **Grand-Est**
- l'**Union Européenne** (FEDER – Fonds Européen de Développement Régional)

*Porté par le laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine - CNRS)*

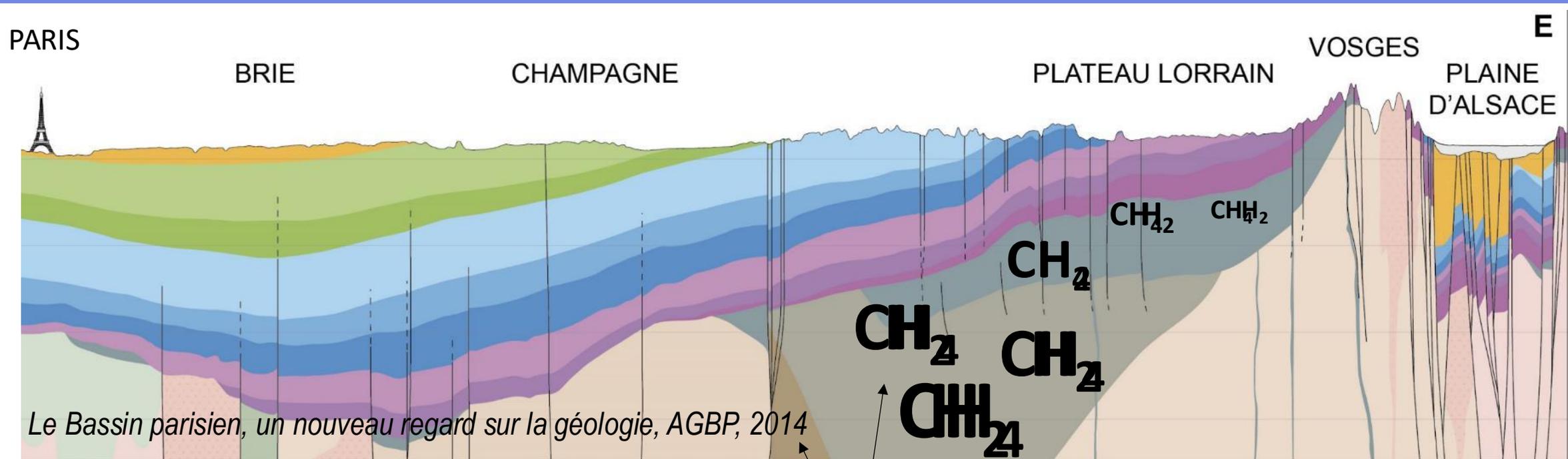
- En collaboration avec les laboratoires PERSEUS, LOTERR, CRUHL
- En partenariat avec la

**FDE**  
Local energy,  
positive impact



# Contexte géologique

Une **coupe géologique** est une représentation en deux dimensions du sous-sol, où les couches géologiques sont représentées en utilisant une **charte de couleurs internationale**



*Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie, AGBP, 2014*

-3 km

En Lorraine le bassin de Paris se superpose au bassin permo-carbonifère



- Permien / Permian
- Stéphanien / Stephanian
- Namurien et Westphalien / Namurian and Westphalian

# FOLSCHVILLER (57)

## LIEU D'INNOVATION & D'EXPÉRIMENTATION

Puits de reconnaissance  
géologique vertical  
(FOLS1A) - 1350 m

Puits de test de production  
dévié (à partir de 900 m)  
(FOLS2) - 1400 m

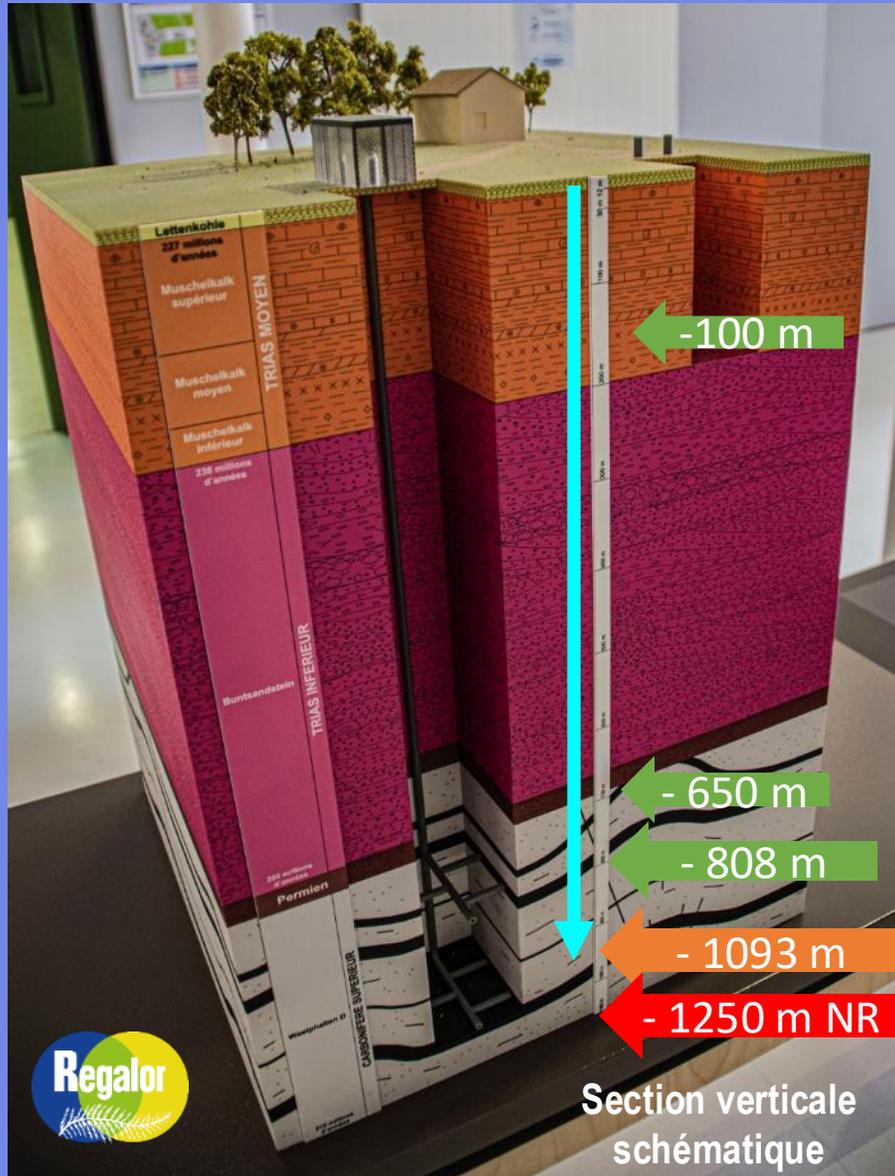
Forage environnemental  
(- 24 et - 34 m)



Photos: Laetitia Vançon



# Un nouvel outil pour la mesure des gaz en forage



## Spécifications

Monitoring des gaz

Continu

Membrane  
semi perméable

Résistance  
à 100 bars

Max 6 cm de  
diamètre

Contrôle à distance

Capteurs  
additionnels

Echantillonnage

De la théorie à la pratique:

La sonde **SysMoG™**

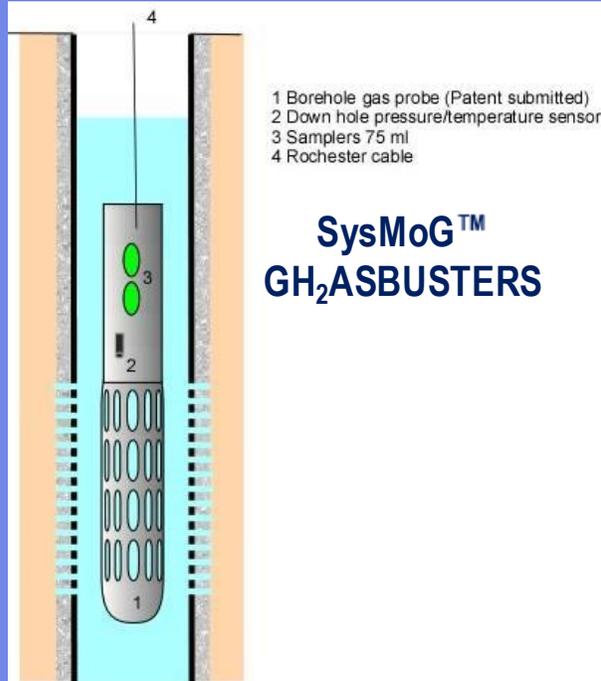


Dépôt de brevet  
européen partagé  
**PME-Université**

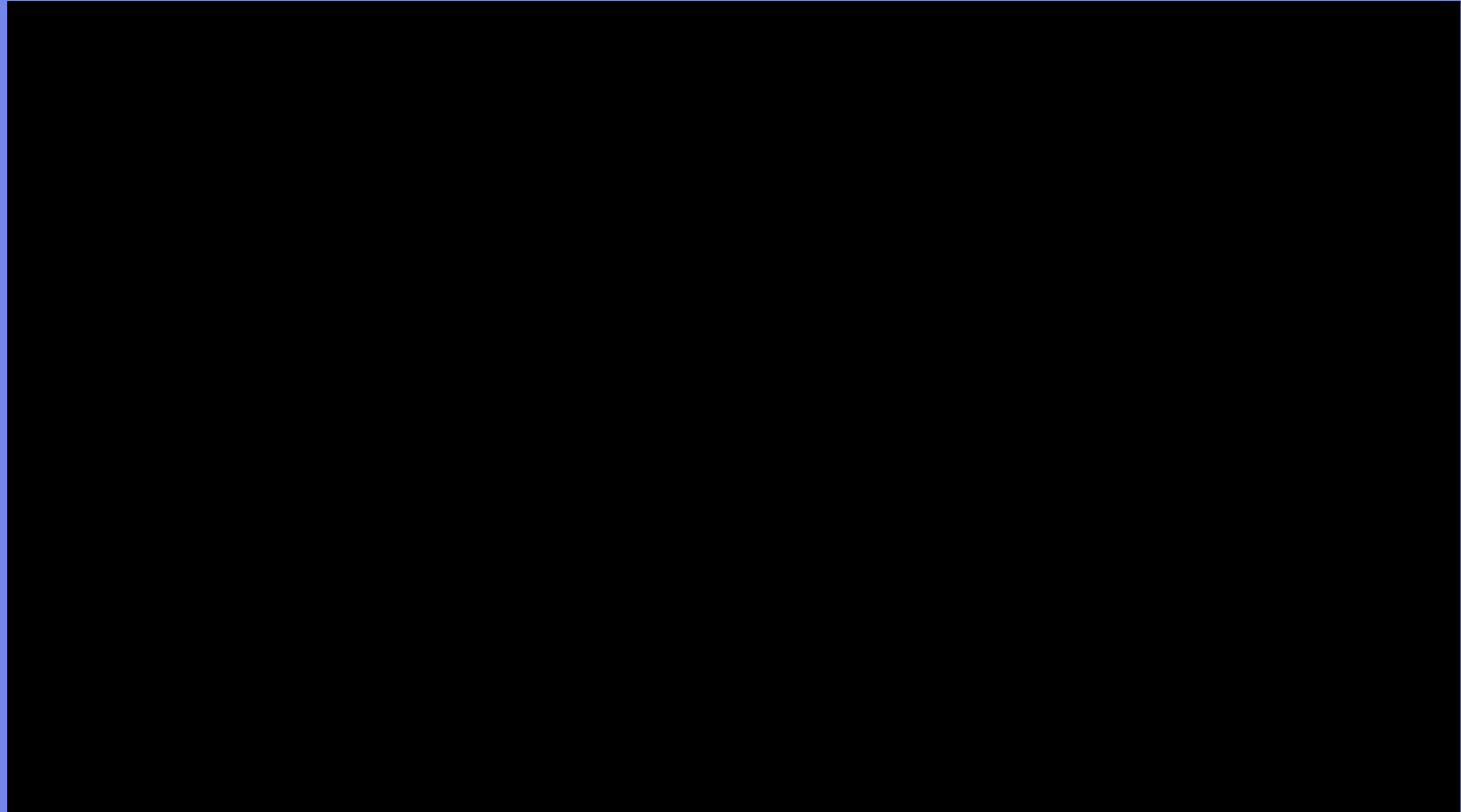
# Echantillonnage des gaz et mesure de la pression de gaz



Exploration H<sub>2</sub>, He, et pas que.....!

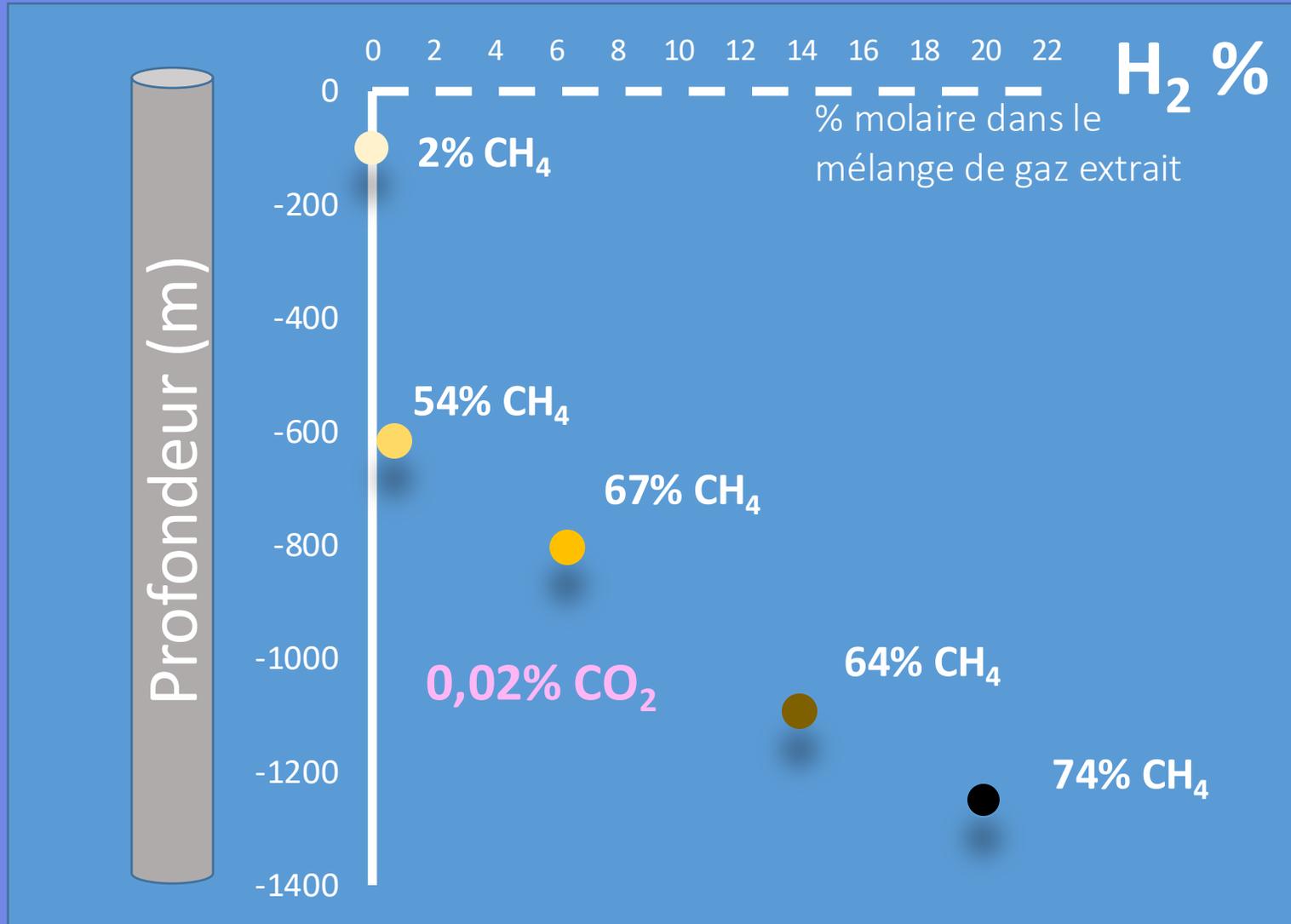
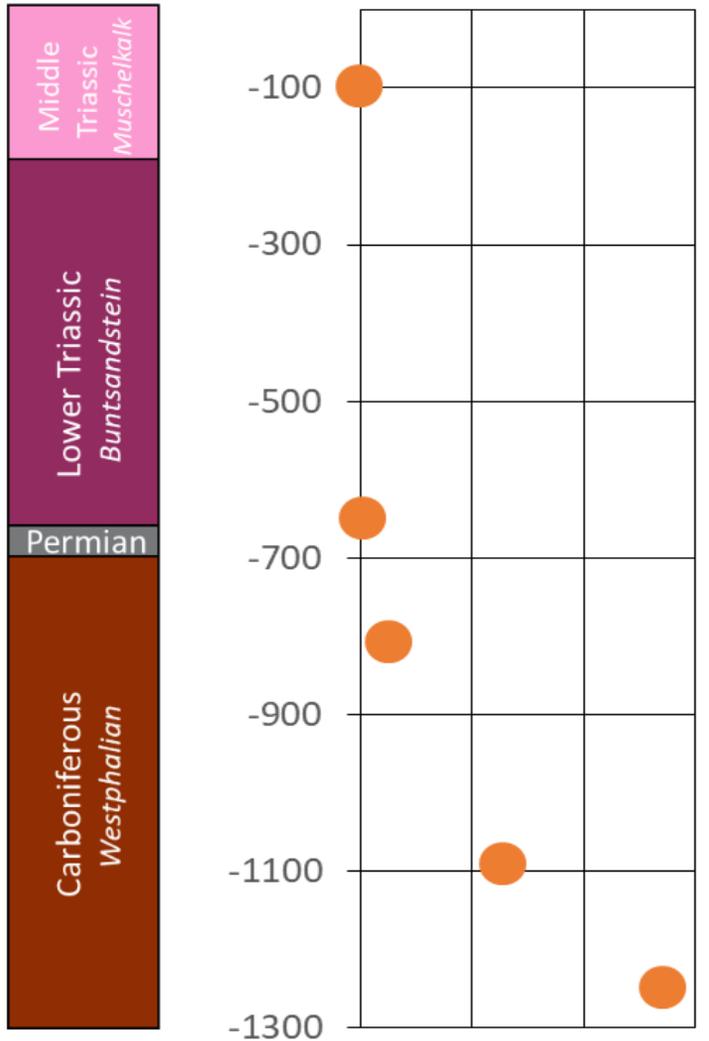


GH<sub>2</sub>ASBUSTERS™



# Une découverte inattendue : l'hydrogène

Dissous dans l'eau H<sub>2</sub> (mg/L)  
de l'aquifère

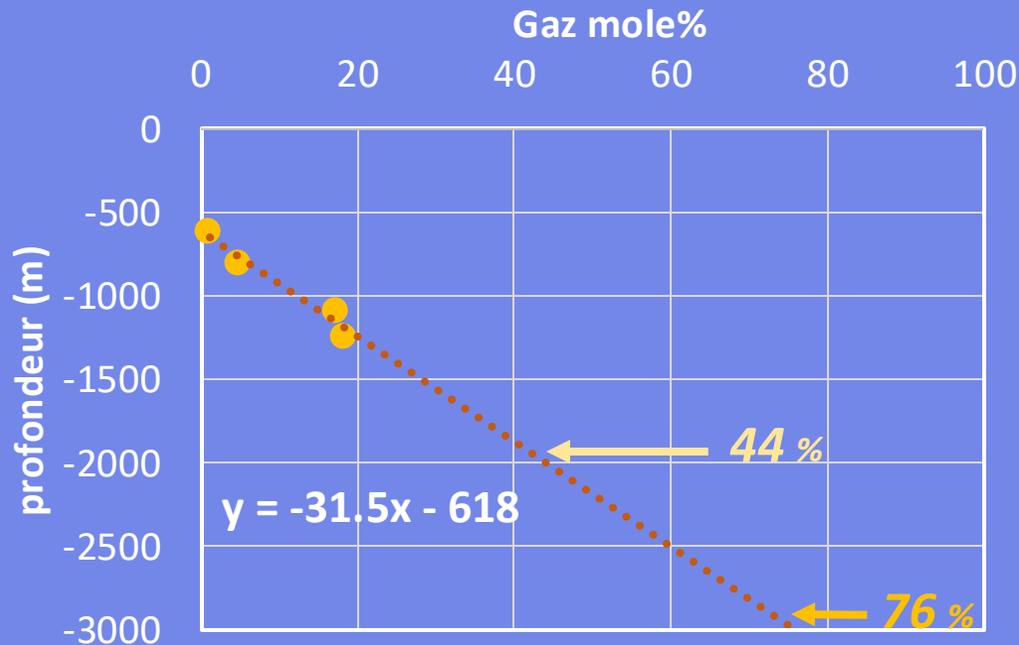


*Une concentration en H<sub>2</sub> qui croît avec la profondeur !*

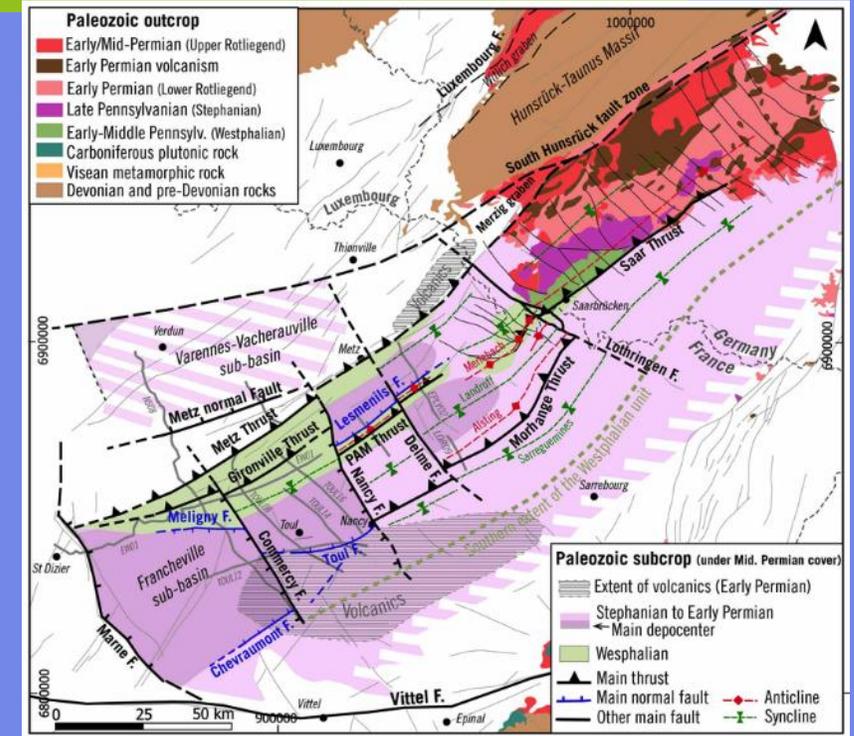
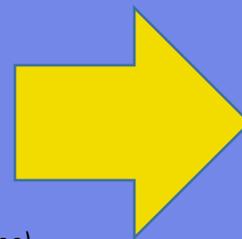
# Ressource : le stock d'hydrogène sous nos pieds

Les données de bases pour l'estimation de la ressource

- Volume de sédiments du Bassin Sarro-Lorrain = 16 000 km<sup>2</sup> x 3 km
- Porosité moyenne du carbonifère = 7 vol%
- La ressource en hydrogène = **H<sub>2</sub> dissous dans l'aquifère**
- Teneur en hydrogène estimée à -3 km = 76% du mélange de gaz



First Discovery of Native hydrogen in the Carboniferous Basin of Lorraine (France)  
Article en cours de soumission au journal « Science »



Hemelsdaël et al., Tectonics, 2023

Horizon 2030 : 20 Mtonnes/an

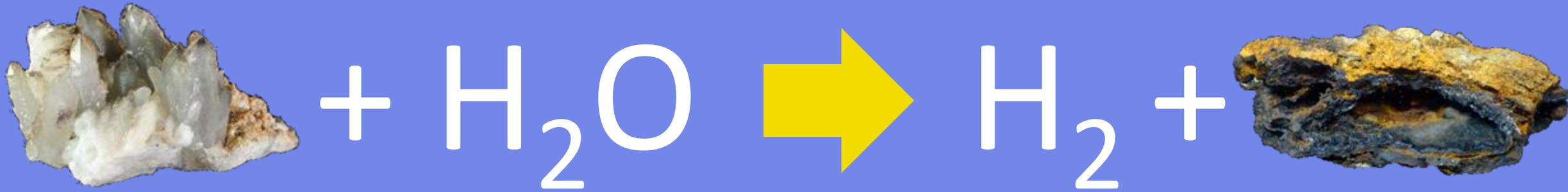
**RESSOURCE H<sub>2</sub> en Lorraine**

**34 Millions de tonnes**

# Le mécanisme de formation de l'hydrogène

Deux hypothèses sont privilégiées

1. Une réaction chimique entre l'eau et des minéraux (carbonates de fer) des formations carbonifères
2. Une réaction chimique du charbon en présence d'eau



dans les deux cas, pour que la réaction se produise, une température d'au moins  $150^{\circ}\text{C}$  est nécessaire, soit une profondeur minimale de 5 km



## CHANGER LA DONNE

- Démontrer que l'hydrogène naturel est **exploitable**
- Changer la donne de l'industrie gazière en démontrant qu'on peut changer de modèle en produisant un **gaz dissous** en aquifère
- « **Rapprocher** » la ressource du consommateur
- Miser sur la **renouvelabilité** et repenser le concept de « réservoir »
- Faire de SysMoG™ l'outil qui révolutionnera **l'exploration du sous-sol**
- Créer **l'usine « in-situ »** capable de séparer tous types de gaz en sous-sol
- Ré-inventer la prospection et l'exploitation du sous-sol en créant une **nouvelle industrie verte et responsable**

# La suite: REGALOR II (2024-2027)

**FDE**

Local energy,  
positive impact



**AIRBUS**

**Renault  
Group**

*+ partenaires français  
et étrangers*

**CNRS**

Recherche  
académique

**EXPLORATION**  
Puits à 4 km

**COS**

**RESSOURCE**  
H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> fatal

**H<sub>2</sub>**

**EXPLOITATION**  
Extraction  
du gaz dissous  
dans l'eau

**TECHNOLOGIE**  
Usine In-situ

**SOLEXPERTS**

**PROSPECTION**  
France &  
étranger



*Merci de votre attention*



# Pistes d'innovation



## Ressource CH<sub>4</sub>

Sous la forme de CBM (Coal Bed Methane)

Energie primaire

Réformage

Avec stockage du CO<sub>2</sub> émis  
dans les couches de charbon

## H<sub>2</sub> bleu

Pyrolyse

valorisation du carbone solide

## H<sub>2</sub> turquoise

## Ressource hydrogène

H<sub>2</sub> associé à CH<sub>4</sub> mais d'origine différente

H<sub>2</sub> renouvelable

Première évidence d'une ressource quantifiée en métropole

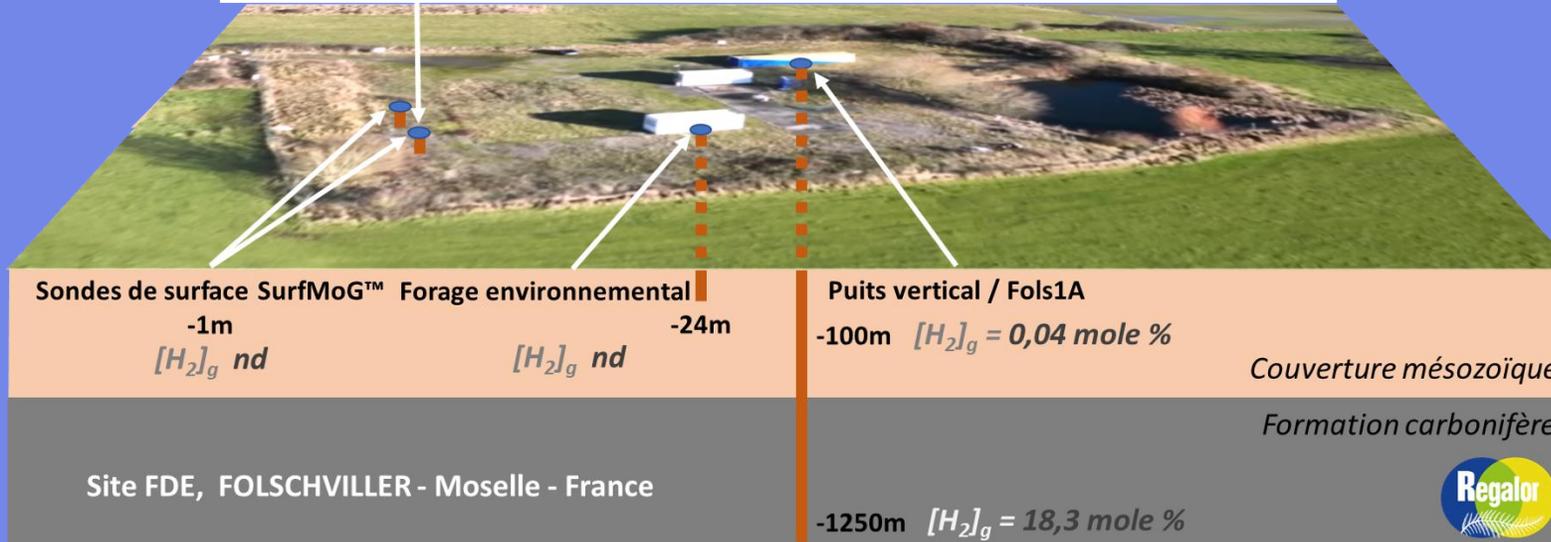
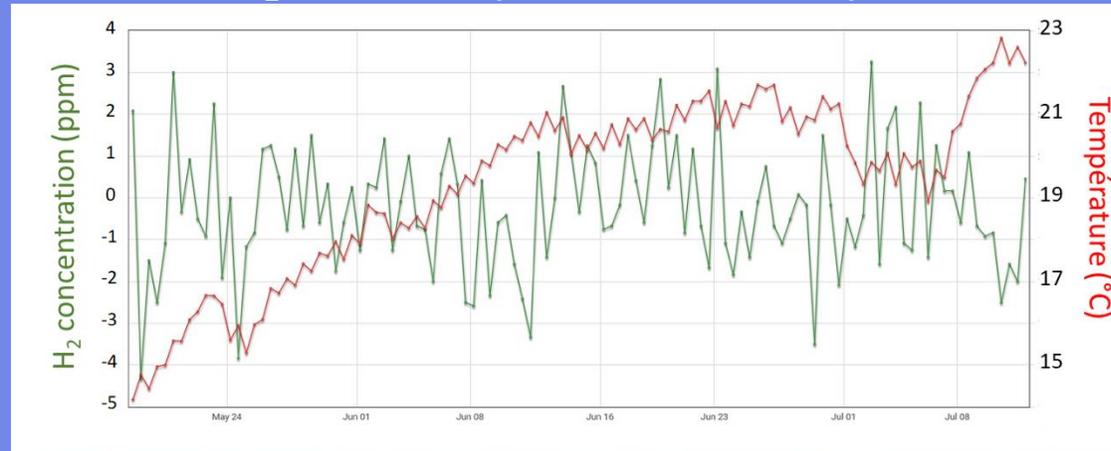
Production mondiale **H<sub>2</sub> gris** (réformage de CH<sub>4</sub>) : **80 Mt/an**

Estimation d'une possible ressource en H<sub>2</sub> blanc en Lorraine : **34 Mt**

## H<sub>2</sub> blanc/natif

# Des conséquences pour la stratégie d'exploration

**Exemple du site de Folschviller (Moselle-France)** Combinaison des informations de monitoring surface et profondeur. Evolution de la concentration de H<sub>2</sub> et de la température, mesurées par les différents type de sonde.





Dégradation des débris organiques

**Tourbe**



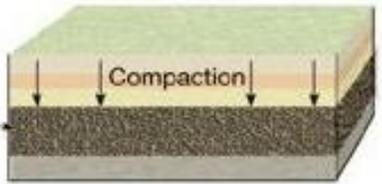
1

Burial



Charbon moyennement énergétique

**Lignite**



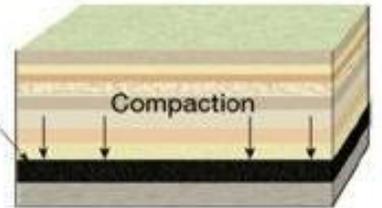
2

Greater burial



Charbon très énergétique

**Charbon bitumineux**



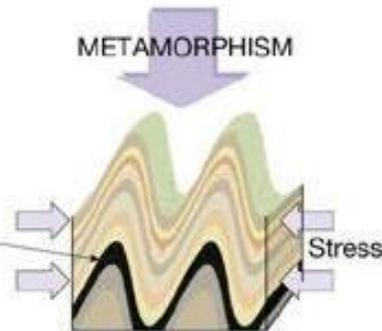
3

METAMORPHISM

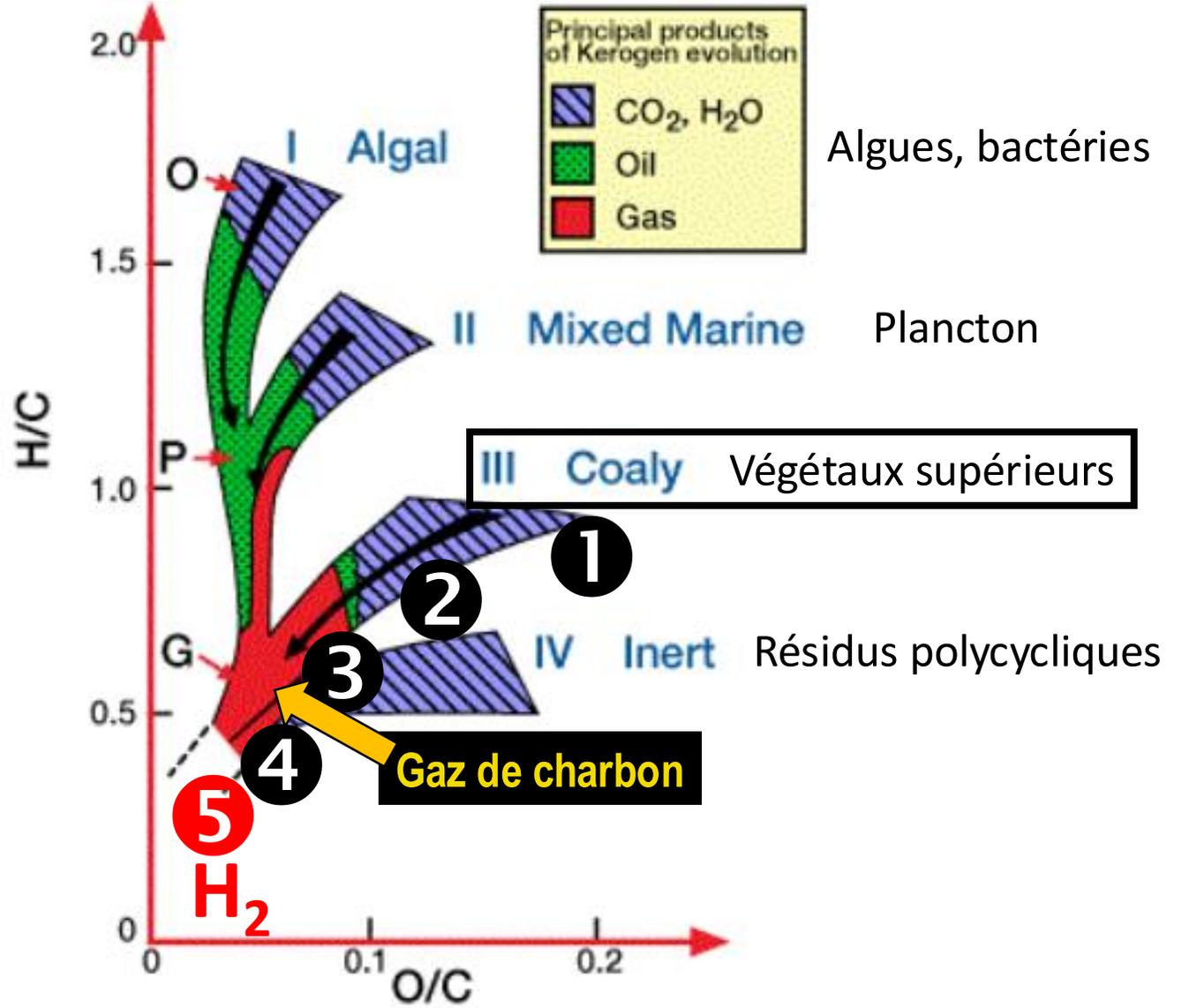


Charbon très énergétique

**Anthracite**



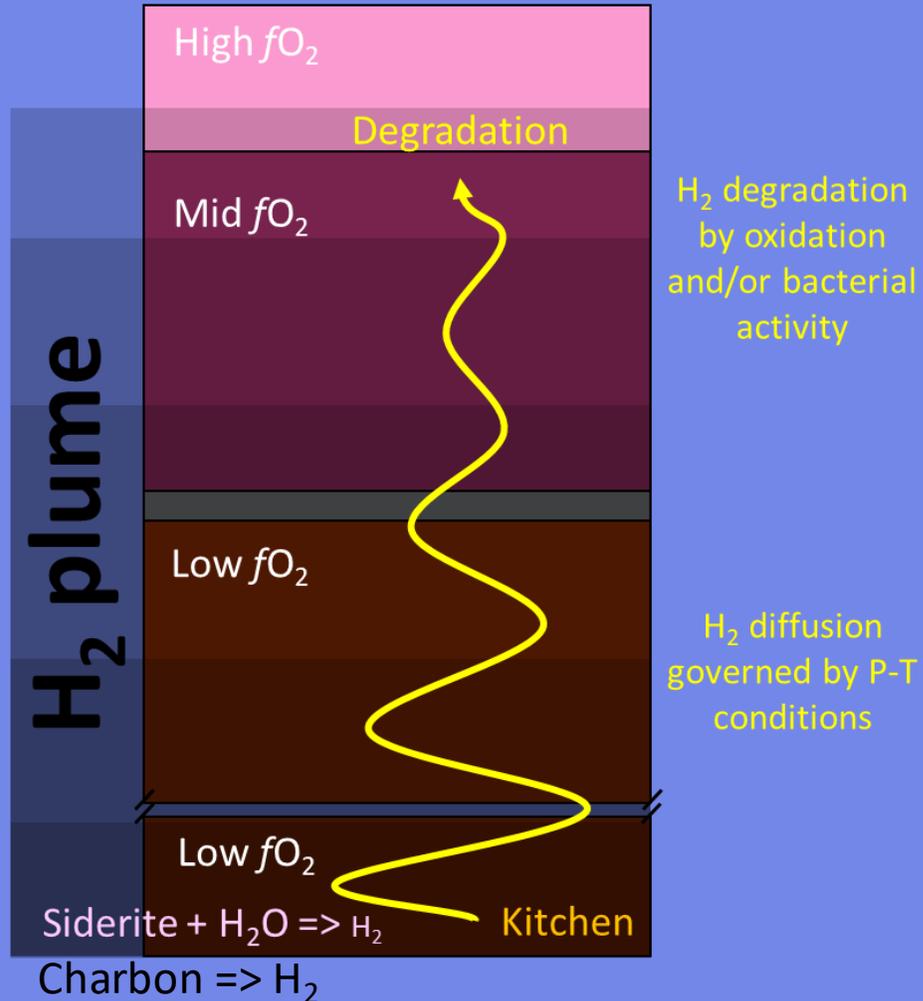
4



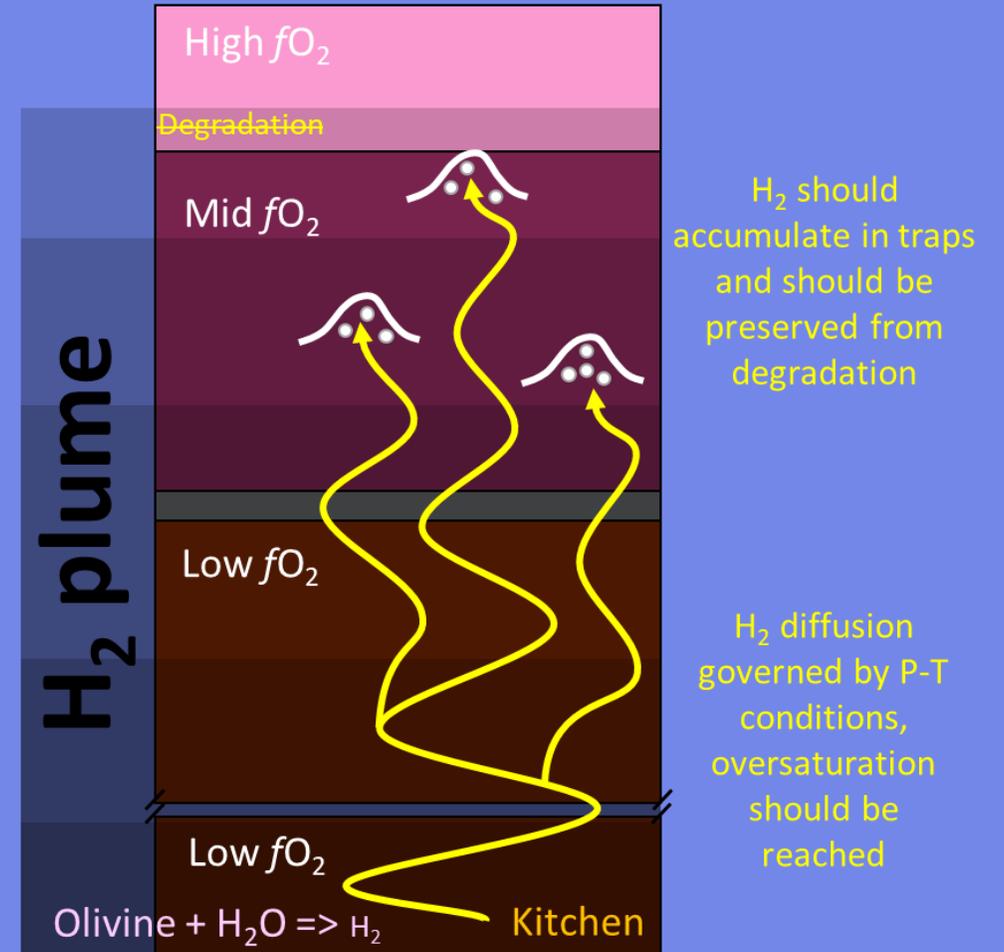
Van Krevelen diagram plotting atomic H/C ratio against atomic O/C ratio

## 2 mécanismes principaux orientent l'exploration et l'extraction

Réservoir type « gaz dissous »



Réservoir type « gaz libre »



Ingénierie d'extraction nouvelle type membranaire

Ingénierie d'extraction type « oil and gas »

# De l'hydrogène naturel partout dans le monde

Des émanations de surface ont été détectées sur les différents continents : des projets sont déjà lancés pour en identifier les sources profondes et les exploiter.

## Les États-Unis ont commencé à forer

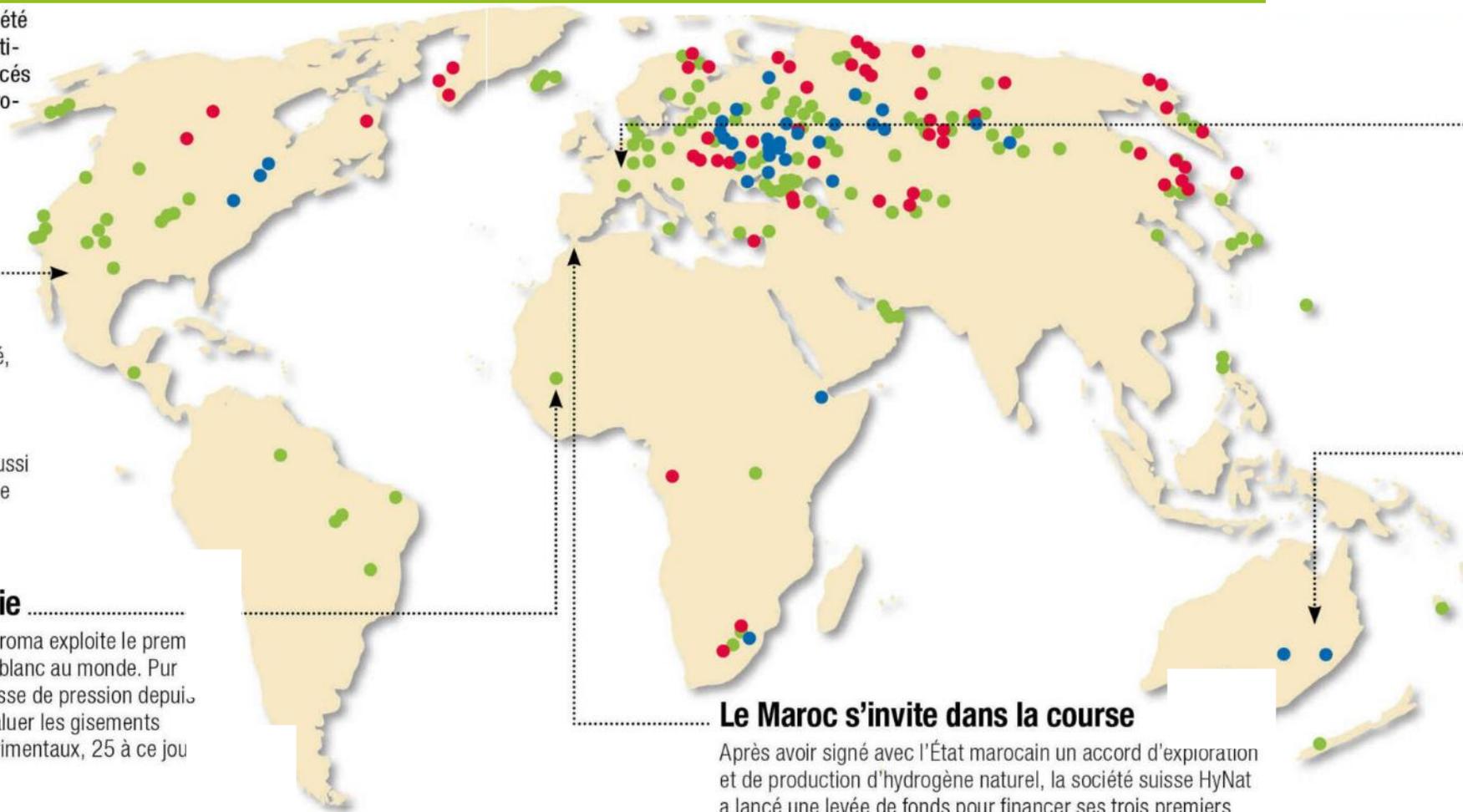
Les sociétés Natural Hydrogen Energy LLC et HyTerra ont achevé, en 2019, le premier forage au monde dédié à la recherche d'hydrogène naturel dans l'État du Nebraska. Elles prospectent aussi dans le Kansas, où de l'hydrogène a été repéré dans des forages anciens.

## Le Mali a montré la voie

À Bourakébougou, la société Hydroma exploite le premier puits de production d'hydrogène blanc au monde. Pur à 98 %, le gaz est puisé sans baisse de pression depuis 2012. L'entreprise continue d'évaluer les gisements disponibles via des forages expérimentaux, 25 à ce jour.

Hydrogène naturel sous forme...

● de gaz libre ● d'inclusions de gaz ● de gaz dissous dans l'eau



## La France démarre tout juste

Deux demandes de permis de recherche d'hydrogène ont été déposées dans l'Hexagone : la première par l'entreprise TBH2, dans les Pyrénées orientales, la seconde en Lorraine, par la Française de l'énergie.

## L'Australie prospecte

De nombreuses entreprises comme Gold Hydrogen et H2EX explorent la péninsule de Yorke et l'île Kangourou, où des émanations d'hydrogène pur à 70-80 % ont été détectées il y a des décennies. Les sous-sols de la région reposent sur des roches susceptibles de générer le précieux gaz.

## Le Maroc s'invite dans la course

Après avoir signé avec l'État marocain un accord d'exploration et de production d'hydrogène naturel, la société suisse HyNat a lancé une levée de fonds pour financer ses trois premiers forages dans les provinces du sud du royaume.

# *D'où vient l'hydrogène naturel (natif, blanc) en Lorraine?*

1. **Dégazage** de l'hydrogène profond via la croûte et le manteau de la Terre
2. **Réaction de l'eau** avec les silicates de fer du manteau terrestre (serpentinisation) ou **avec les roches porteuses de carbonates de fer** ou sulfures de fer de la croûte terrestre
3. **Décomposition des hydroxyles** dans la structure des minéraux
4. **Radiolyse** naturelle de l'eau au contact des minéraux uranifères
5. **Décomposition du charbon** en anthracite puis graphite
6. **Activité bactérienne**
7. **Interaction entre acier et eau** dans les forages ou les galeries de mine
8. **Friction** dans zones de faille