



communauté de l'auxerrois

# L'Hydrogène

veille scientifique & économique

*Emmanuel JOBARD*

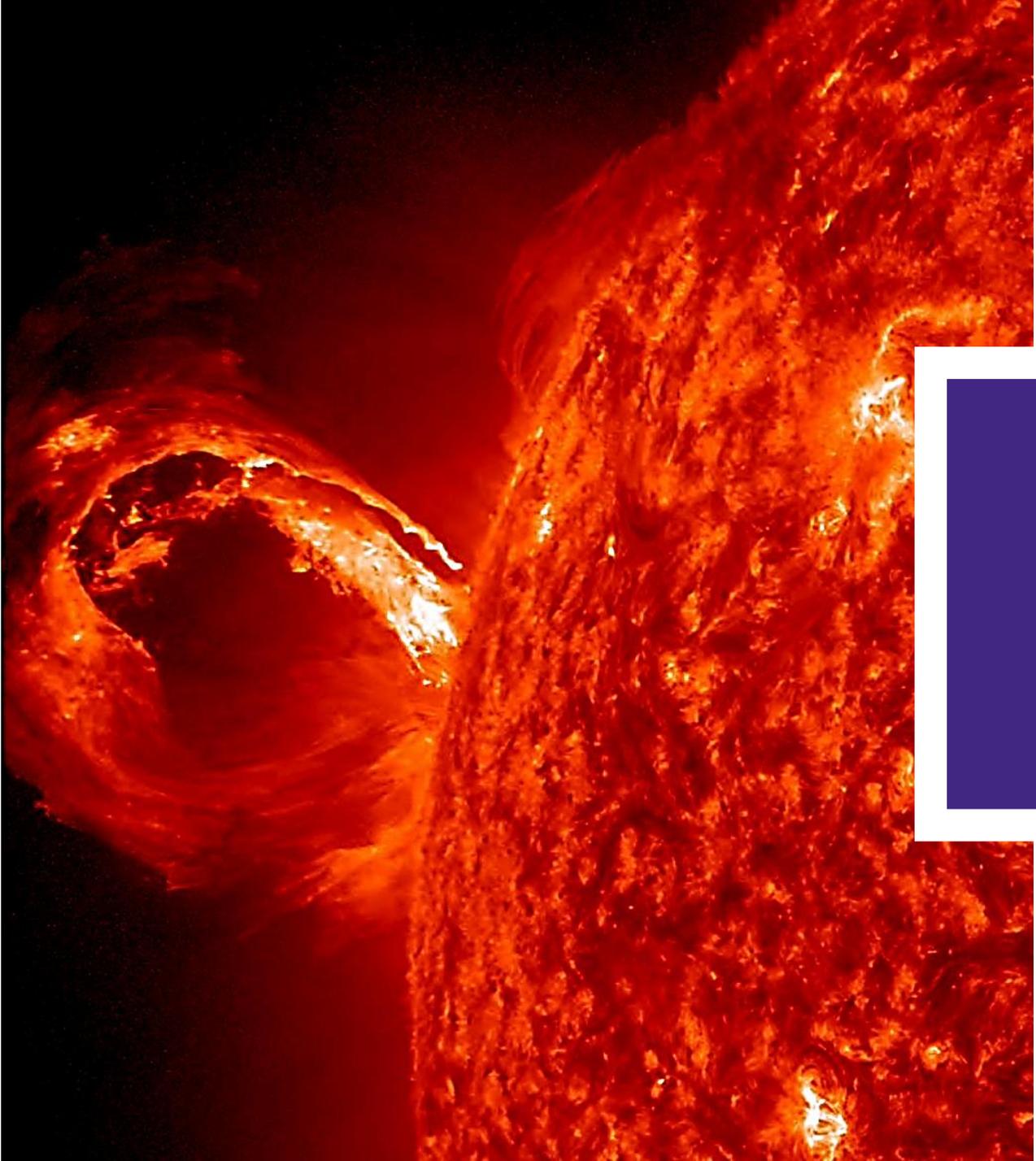
*Chargé de mission développement économique*

[www.agglo-auxerrois.fr](http://www.agglo-auxerrois.fr)

# Sommaire

- L'hydrogène : aux origines de la matière
- Les propriétés de l'hydrogène
- Les sources d'hydrogène
- Le stockage de l'hydrogène
- Les utilisations potentielles
- L'écosystème hydrogène de l'Auxerrois





# L'HYDROGÈNE : AUX ORIGINES DE LA MATIÈRE

# Aux origines de l'univers ...



**Avant le  
"Big Bang"**



13,7 Ga

L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

Aujourd'hui

# Aux origines de l'univers ...



**Instant  
zéro**



> **Le Big Bang :**

**Théorie** selon laquelle **toute la matière** de l'univers tient dans un **volume minuscule** et sous la forme de **particules élémentaires**

L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

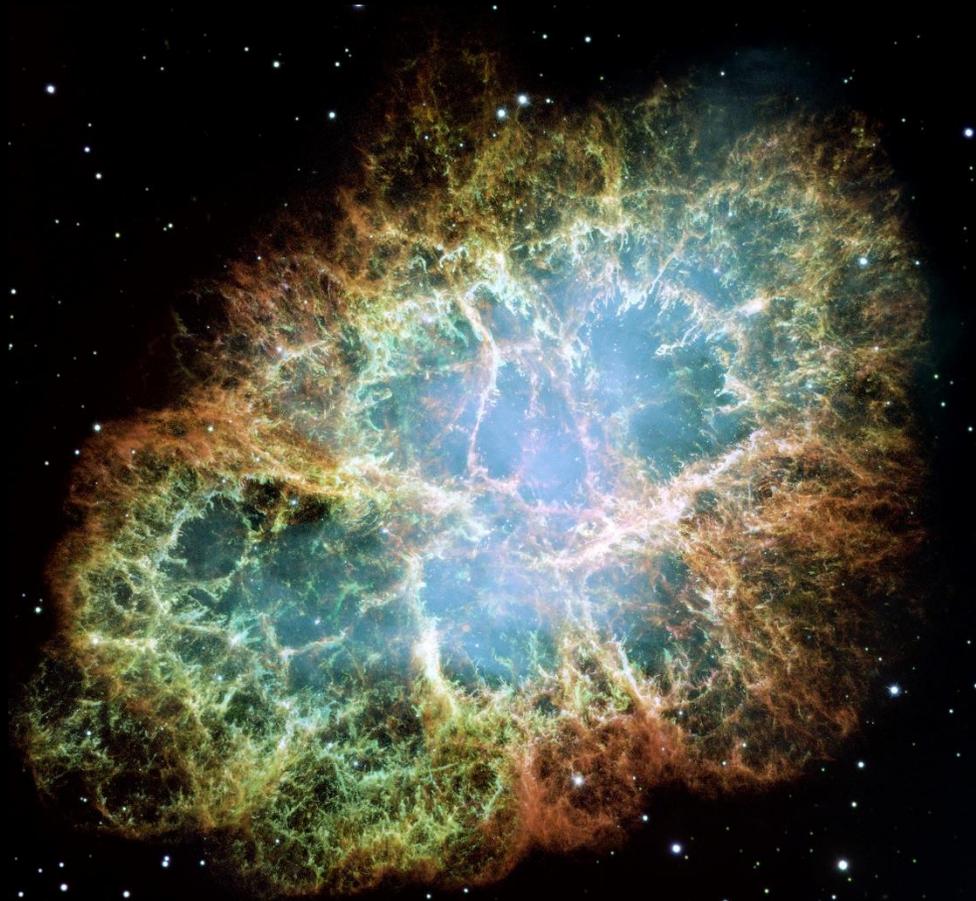
13,7 Ga

Aujourd'hui

# Aux origines de l'univers ...



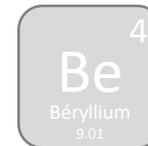
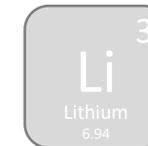
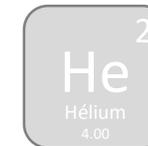
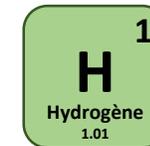
Les **1<sup>ères</sup>**  
heures



> **Expansion**

Formation des **éléments légers**

*(Nucléosynthèse primordiale)*



L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

13,7 Ga

Aujourd'hui

# Aux origines de l'univers ...



**100 millions  
d'années**

> **Accrétion de la matière :**

formation de **nuages de gaz**  
*(nébuleuses – berceau des étoiles)*

L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

13,7 Ga

Aujourd'hui

# Aux origines de l'univers ...



100 millions  
d'années

## > Complexification

Formation des **1<sup>ères</sup> étoiles**  
Éléments **plus lourds**  
(*Nucléosynthèse stellaire*)



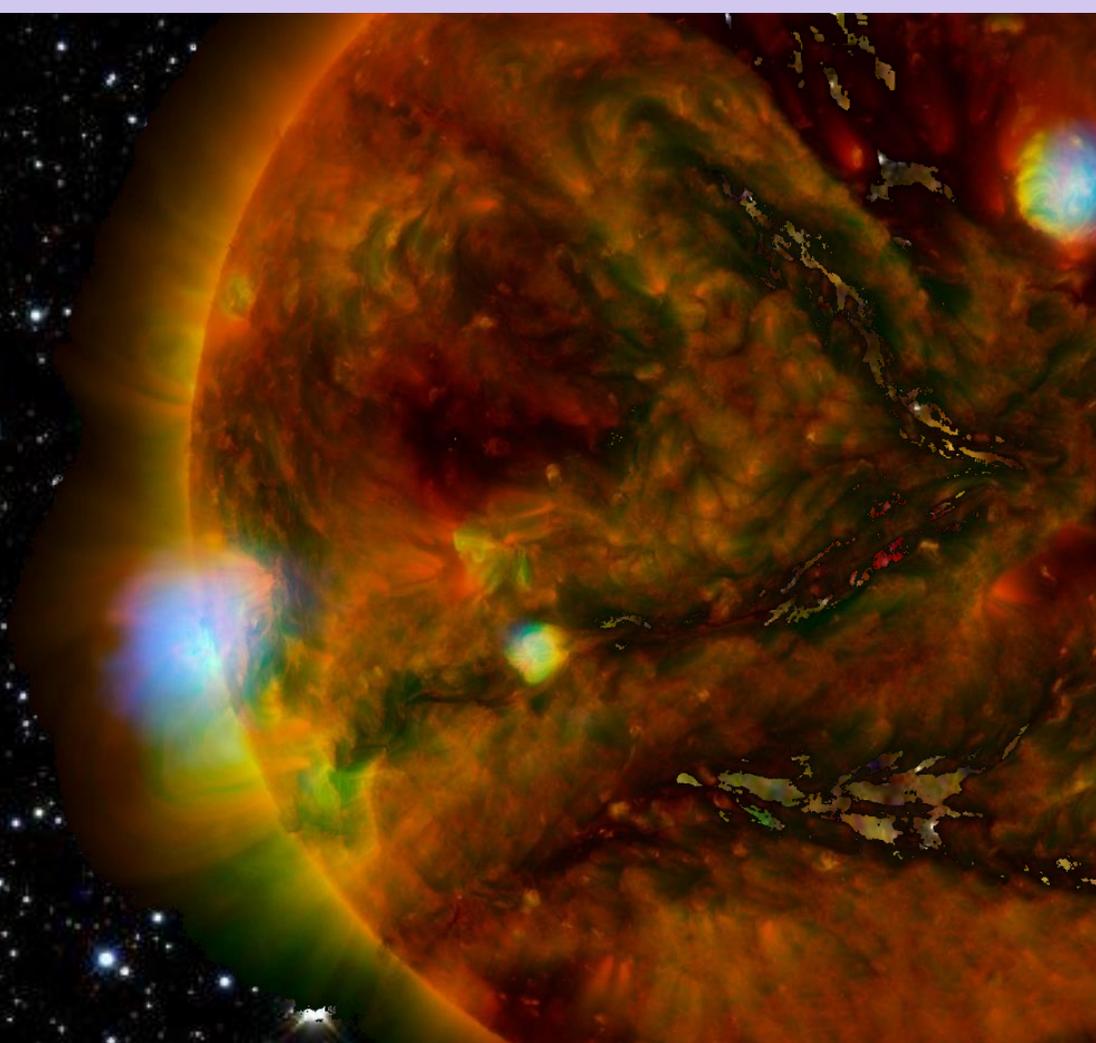
L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

13,7 Ga

# Aux origines de l'univers ...



100 millions  
d'années



## Densification des étoiles

IA																	VIIIA	
1	H																	He
	Hydrogène																	Hélium
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
	Lithium	Béryllium											Bore	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Neon
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
	Sodium	Magnésium											Aluminium	Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	Potassium	Calcium	Scandium	Titane	Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel	Cuivre	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Sélénium	Brome	Krypton
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
	Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdène	Technétium	Ruthénium	Rhodium	Palladium	Argent	Cadmium	Indium	Étain	Antimoine	Tellure	Iode	Xénon
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	Césium	Barium		Hafnium	Tantale	Tungstène	Réhenium	Osmium	Iridium	Platine	Or	Mercure	Thallium	Plomb	Bismuth	Polonium	Astatoïde	Radon
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
	Francium	Radium		Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Böhmium	Hassium	Moscovium	Darmstadtium	Rötenbergium	Unbibium	Ununtrium	Unquadrium	Unpentium	Unsexium	Unseptium	Unoctium
	* lanthanides																	
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
	Lanthane	Cérite	Praseodyme	Néodyme	Prométhium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutécium			
	** actinides																	
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			
	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Ameéricium	Curium	Berkélium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lavendium			

L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

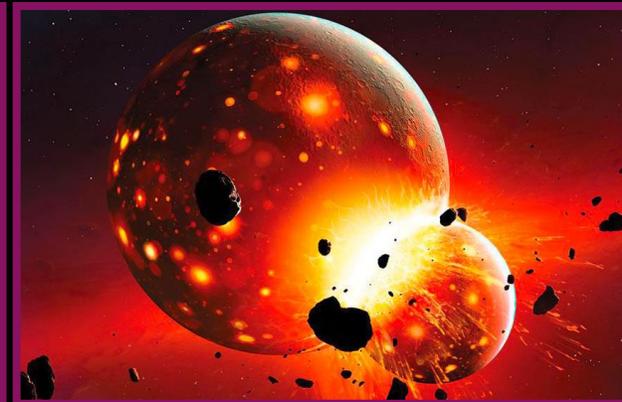
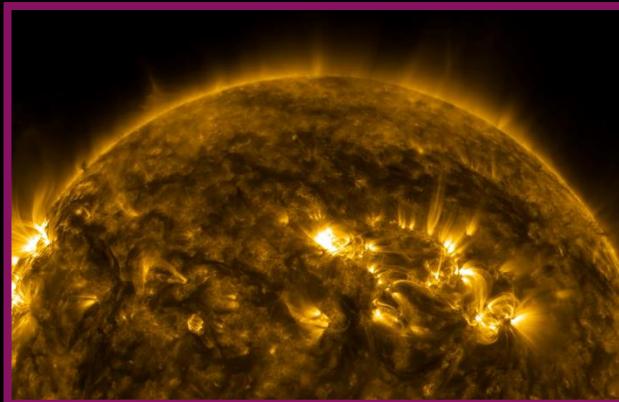
13,7 Ga

Aujourd'hui

# Aux origines de l'univers ...



**Et ensuite...**



**13 milliards d'années**  
Formation des galaxies

**4.6 milliards d'années**  
Formation du Soleil

**4.5 milliards d'années**  
Formation de la Terre

**2.5 milliards d'années**  
Refroidissement  
Foisonnement de la vie



L'histoire de l'univers – 13,7 Milliards d'années

13,7 Ga

4,6 Ga

4,5 Ga

2,5 Ga

Aujourd'hui

# La Terre au rythme des extinctions ...

**5 extinctions  
Pendant 500 Ma**

## > Extinctions de masse :

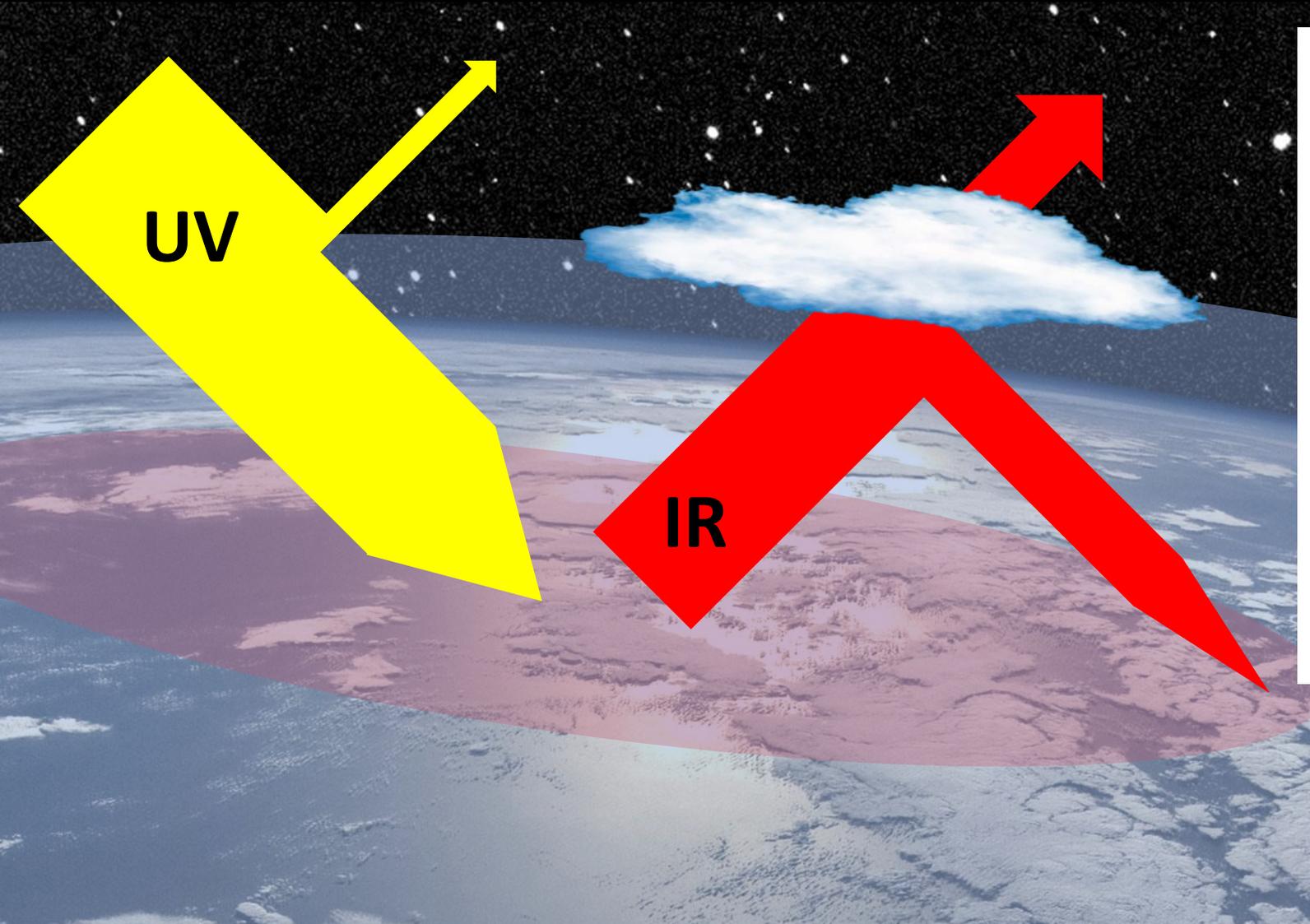
**Diminution significative** et rapide de l'abondance de la **vie** (causes extraterrestres et/ou géologique)

*Par exemple, il y a 65 Ma (Crétacé/Tertiaire), par l'impact d'une météorite de 10 km de diamètre.*



# La 6<sup>ième</sup> extinction de masse en direct

**Aujourd'hui**  
"Anthropocène"  
> Relargage de CO<sub>2</sub>...



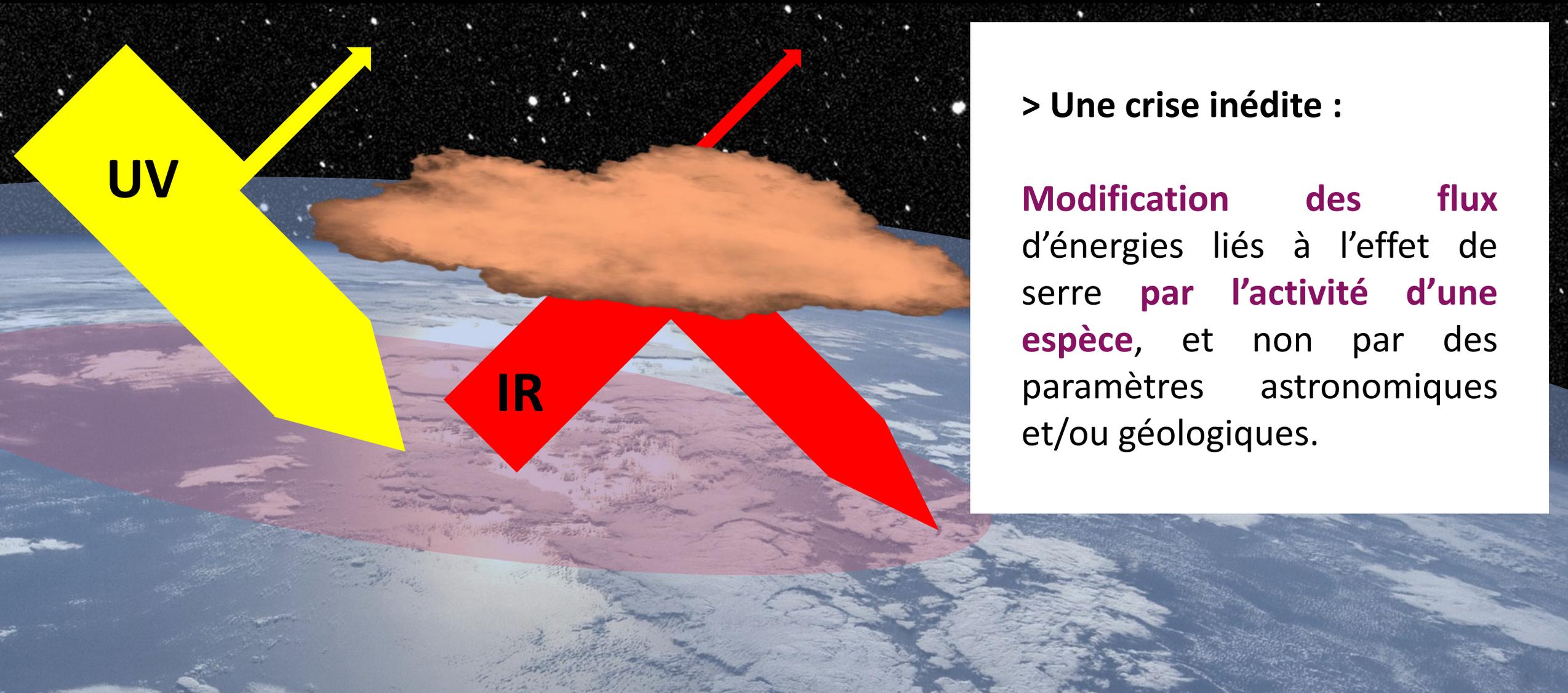
> L'effet de serre :

C'est un **processus naturel** qui **augmente la température** de la Terre d'environ 30° en **piégeant les IR** dans l'atmosphère.

*Les principaux gaz à effet de serre sont l'eau, le CO<sub>2</sub> et le méthane (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).*

# La 6<sup>ième</sup> extinction de masse en direct

**Aujourd'hui**  
"Anthropocène"  
> Relargage de CO2...



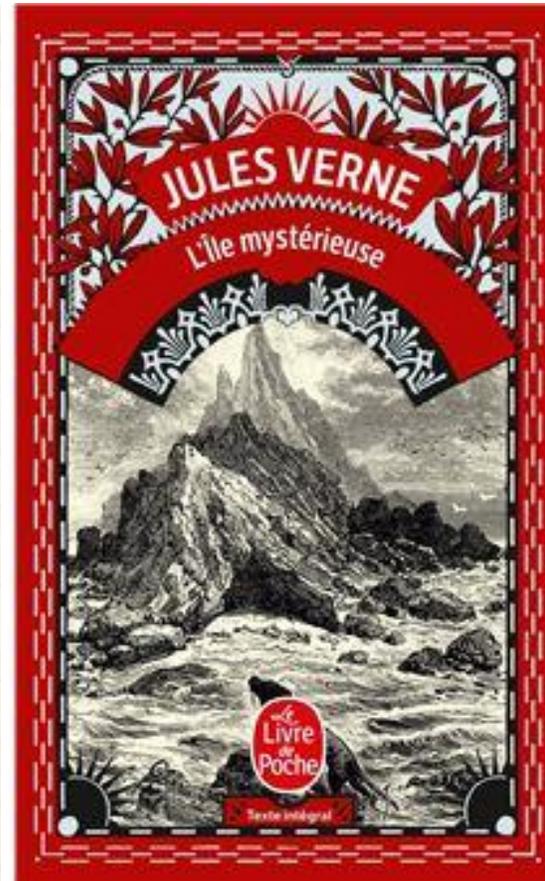
> Une crise inédite :

**Modification des flux** d'énergies liés à l'effet de serre **par l'activité d'une espèce**, et non par des paramètres astronomiques et/ou géologiques.

# Décarboner les activités humaines



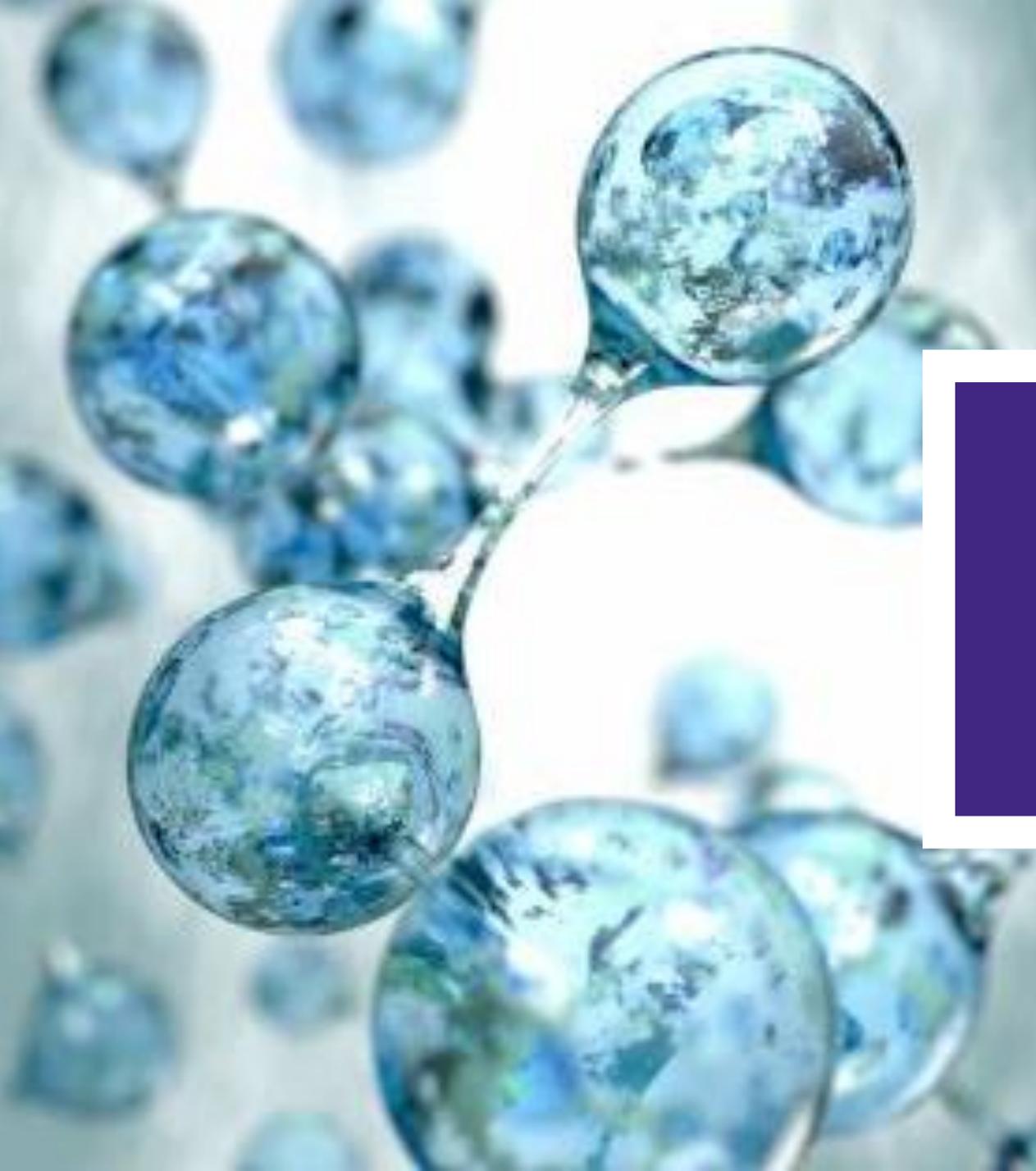
© Archivist / stock.adobe.com



## Cyrus Smith :

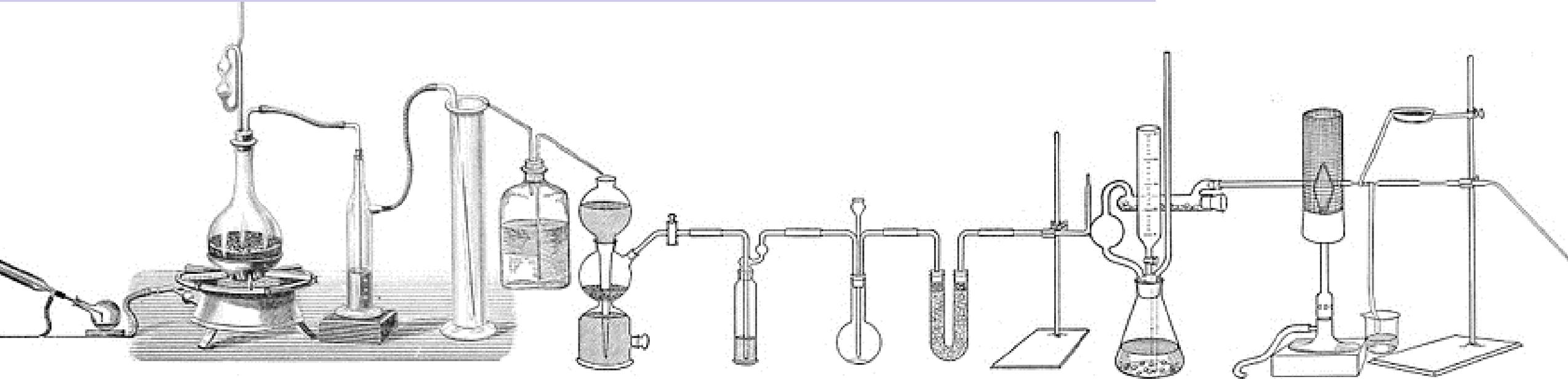
*"Je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés seuls ou ensemble, fourniront une source inépuisable de chaleur et de lumière, d'une intensité dont le charbon n'est pas capable."*

*L'île Mystérieuse – Jules Verne (1875)*



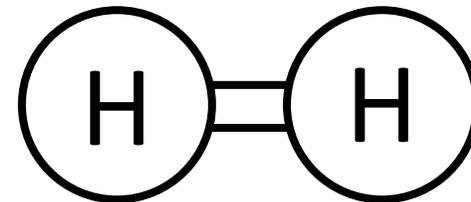
# LES PROPRIÉTÉS DE L'HYDROGÈNE

# Quelques données sur l'hydrogène



**75 %**

Abondance de l'atome  
d'hydrogène dans l'univers  
(% massique)



2 atomes d'hydrogène pour  
former la molécule de  
dihydrogène (H<sub>2</sub>)

# 2 sources d'énergie distinctes



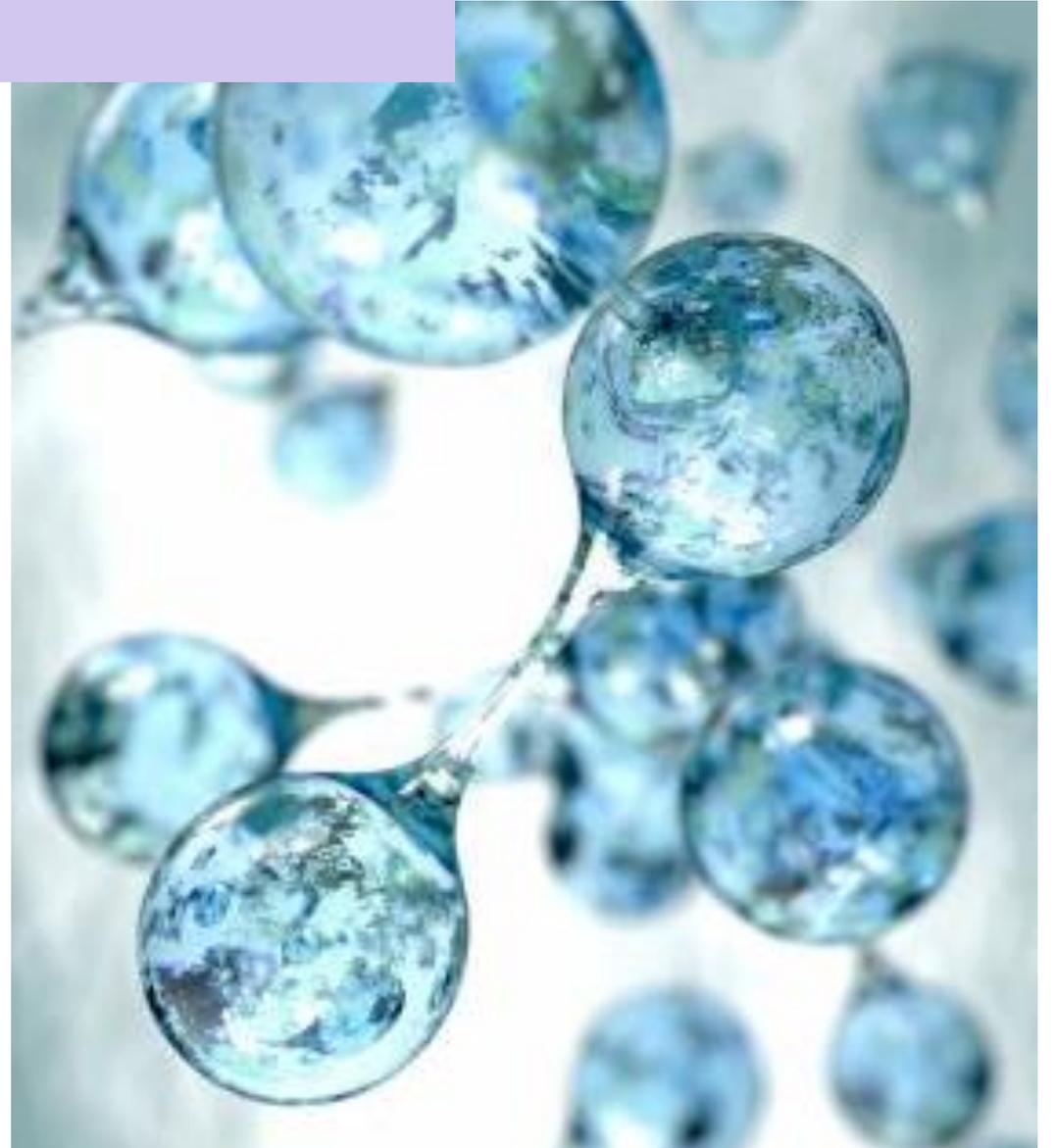
## Chaleur

Combustion de l'hydrogène  
Alimente un moteur à explosion

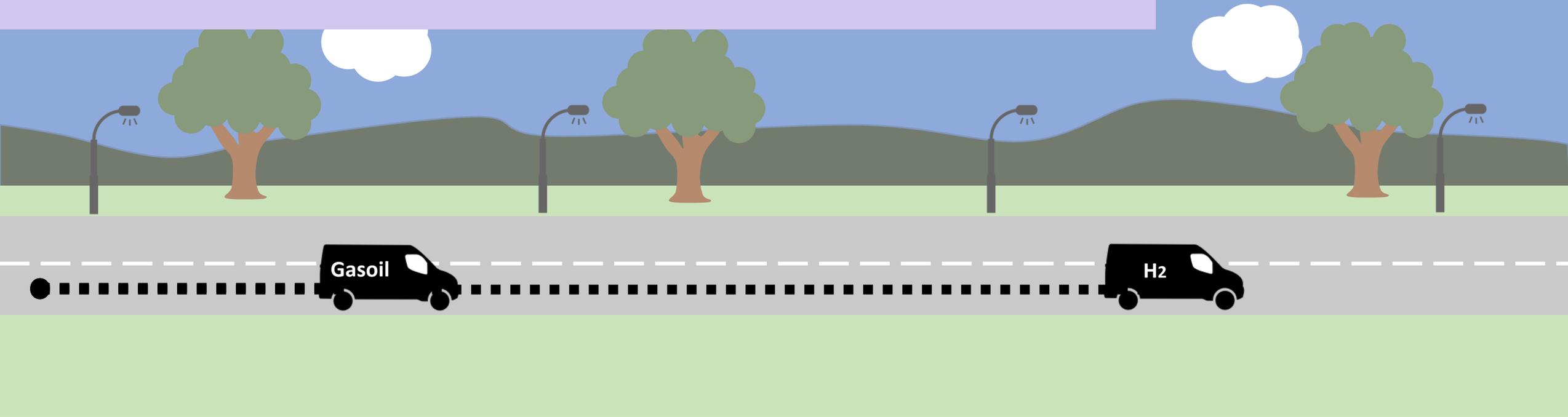


## Électricité

Pile à combustible  
Alimente un moteur électrique



# Une molécule très énergétique



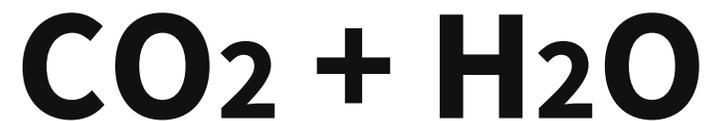
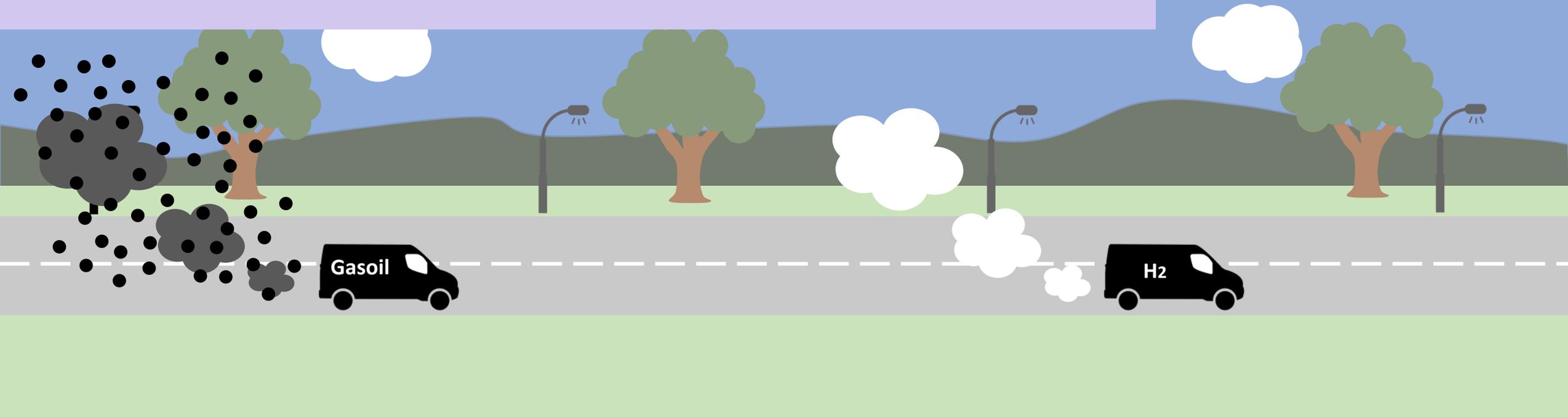
**~30 km**

Distance parcourue avec  
1 Kg d'hydrocarbure  
(*gasoil, essence, gaz naturel*)

**~100 km**

Distance parcourue avec  
1Kg d'hydrogène  
(*pile à combustible*)

# Pas de pollution directe



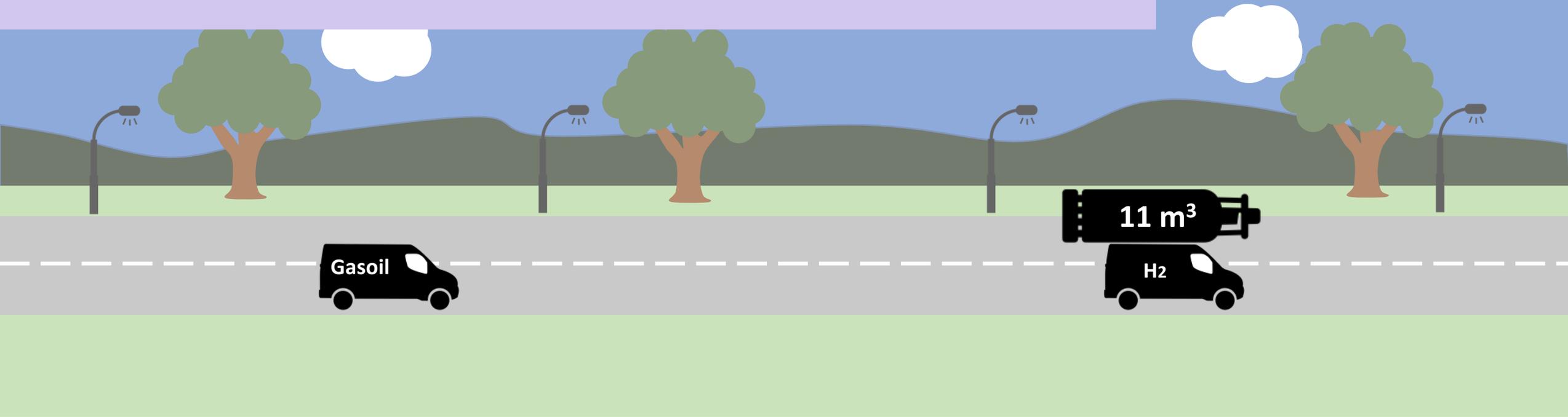
Rejets liés à la combustion des hydrocarbures + particules fines, oxydes d'azotes...

*(peu de particules fines au gaz naturel)*



Seuls rejets liés à l'utilisation (combustion ou électrolyse) de l'hydrogène

# Une molécule très légère



À température ambiante (25°C) et pression atmosphérique (1 bar)

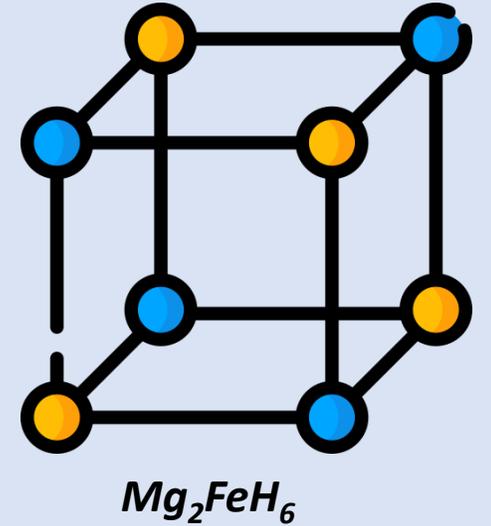
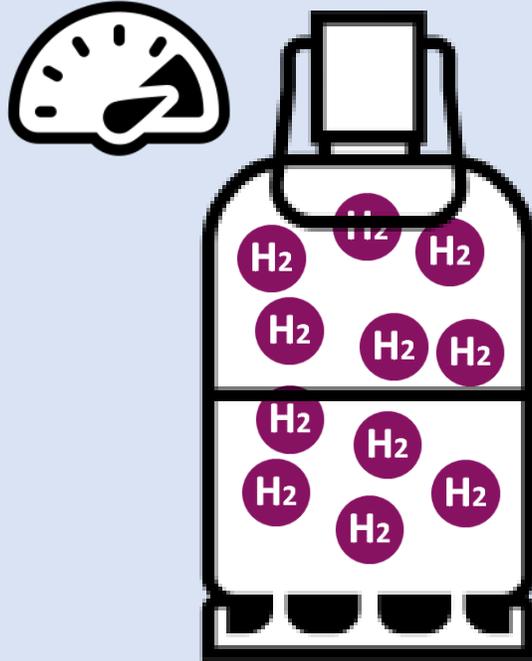
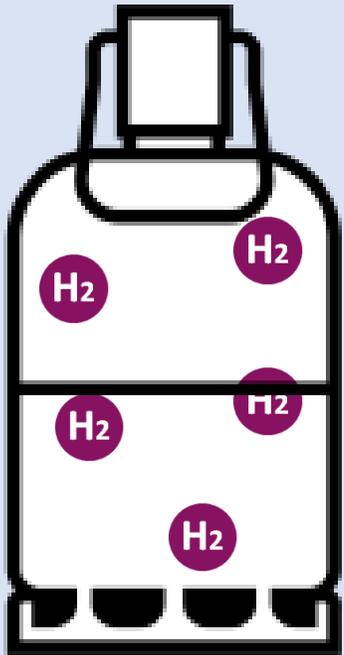
**1.3 L**

Volume pour 1 Kg de carburant  
(gasoil, essence)  
1 Kg de gaz naturel → 1000 L

**11 000 L**

Volume pour 1 Kg d'hydrogène

# Augmenter la densité pour le stockage



*Plusieurs solutions pour stocker cette matière*

**25°C / 1 bar**

1 Kg dans 11 000 L

**25°C / 700 bar**

1 Kg dans 25 L (densité × 400)

**-250°C / 1 bar**

1 Kg dans 15 L (densité × 700)

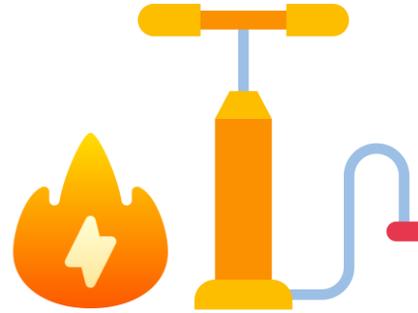
**25°C / 1 bar**

1 Kg dans 6 L

# Un effet Joule –Thomson ... inverse

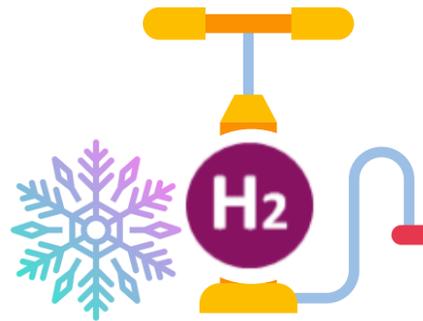
## > Effet Joule Thomson :

La **compression** d'un gaz se traduit par une **augmentation de la température**



## > Effet Joule Thomson inverse :

Pour le **dihydrogène** l'effet Joule Thomson est **inversé** à température ambiante



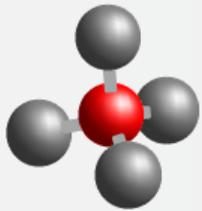


# LES PRINCIPALES SOURCES D'HYDROGÈNE

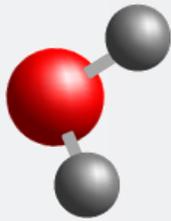
# Les sources artificielles

## Le vaporeformage

(hydrogène gris)



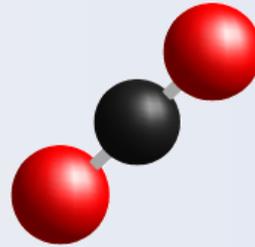
Méthane  
CH<sub>4</sub>



Vapeur d'eau HT°  
H<sub>2</sub>O



Dihydrogène  
H<sub>2</sub>



Dioxyde de carbone  
CO<sub>2</sub>

> H<sub>2</sub> à partir de méthane et d'eau à haute température (700 – 1000 °C)

> 95% de l'H<sub>2</sub> est produit à partir de ressources fossiles

> ~1.5€/Kg

> Couplage à un stockage de CO<sub>2</sub> (Hydrogène bleu – 5€/Kg)

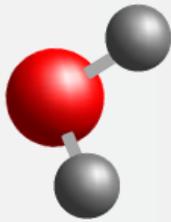


Unité de production d'H<sub>2</sub> par vaporeformage  
raffinerie de Jubail, en Arabie saoudite

# Les sources artificielles

## Electrolyse de l'eau

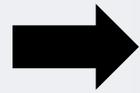
(hydrogène vert)



Eau  
 $H_2O$



Electricité  
décarbonée



Dihydrogène  
 $H_2$



Oxygène  
 $O$

> Clivage de la molécule d'eau par l'électricité

> 5% de l' $H_2$  est produit à partir de l'électrolyse de l'eau

> Permet de stocker l'énergie produite par EnR

> ~10€/Kg



AIR PRODUCTS



Air Liquide

Schlumberger



Electrolyseur McPhy (modèle large)

# Les sources artificielles

## Autres sources potentielles



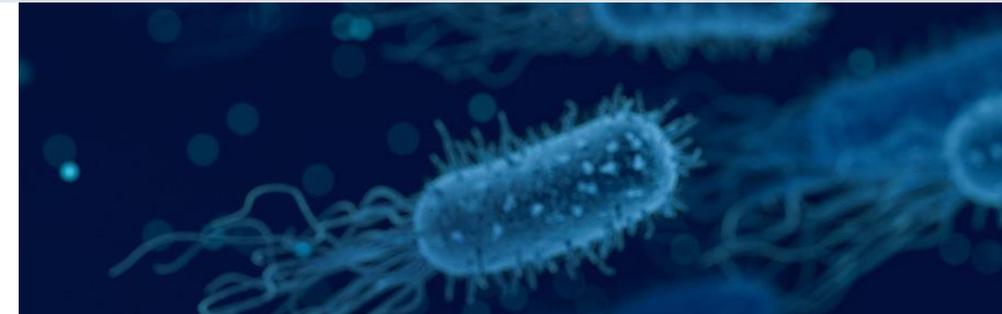
**Photosynthèse** des bactéries



**Photolyse** de l'eau



**Radiolyse** de l'eau



# Les sources naturelles



**Thermolyse** de l'eau



**Hydratation** de certaines roches



**Désintégration** radioactive minérale



45-8  
Energy



ENGIE



PETROMA



geo4u



> Au mali, un forage à 200 m permet de produire de l'H2 **depuis 2011**

> **Pas de fuites** & des **remontées en pression** (renouvellement)

# Les sources naturelles



*Carte non exhaustive des émanations connues (H<sub>2</sub> + dérivé d'H<sub>2</sub>)*

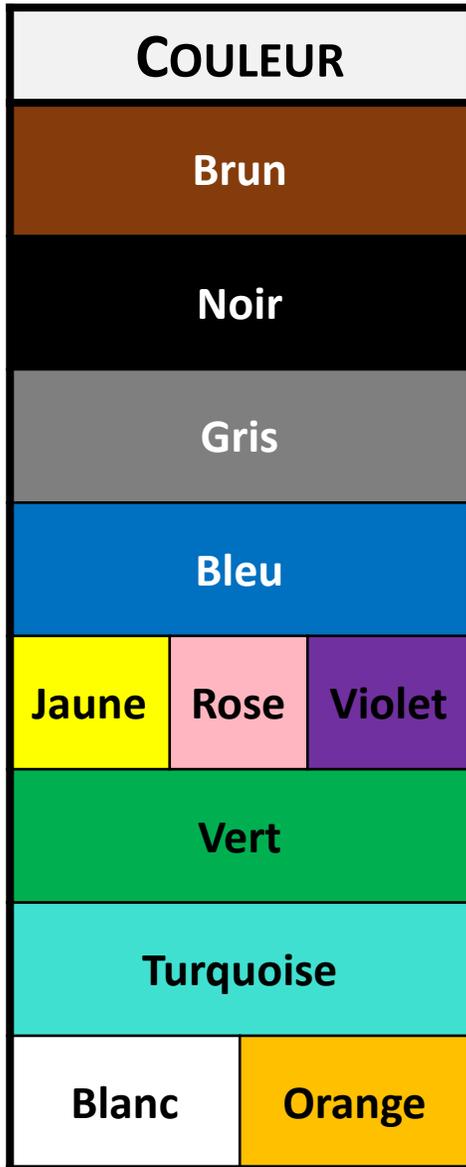
*Source ©Isabelle Moretti, modifiée d'après Prinzhofer et Deville, 2015*

# 50 nuances d'hydrogène...

COULEUR	PROCÉDÉ	MATIÈRE PREMIÈRE	SOURCE ÉNERGÉTIQUE	EMISSIONS CO2
Brun	Gazéification + Vaporeformage	Lignite	Combustibles fossiles	++++
Noir		Charbon		+++
Gris	Vaporeformage	Méthane		++
Bleu	Vaporeformage + CCS			+
Jaune	Electrolyse	Eau	Electricité d'origine nucléaire	-
Rose			Electricité d'origine renouvelable	--
Violet				
Vert				
Turquoise	Pyrolyse	Biométhane	Electricité toutes origines	---
Blanc	Extraction	Minéraux + eau souterraine	/	----
Orange	Oxydation + CCS	Minéraux + eau + catalyseur	/	---- (-)

*Pas de consensus international sur la nomenclature*

# Vers une simplification



*Ordonnance du 17 février 2021  
loi énergie climat sur l'hydrogène*

**Le carboné** : produit grâce à des énergies fossiles

**Le bas carbone** : produit grâce à des énergies faiblement émettrices

**Le renouvelable** : produit grâce à des énergies renouvelables

?



# LE STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE

# Le stockage de surface



En phase gaz à **haute pression**



En phase liquide à **basse température**



En phase solide (**hydrure**)



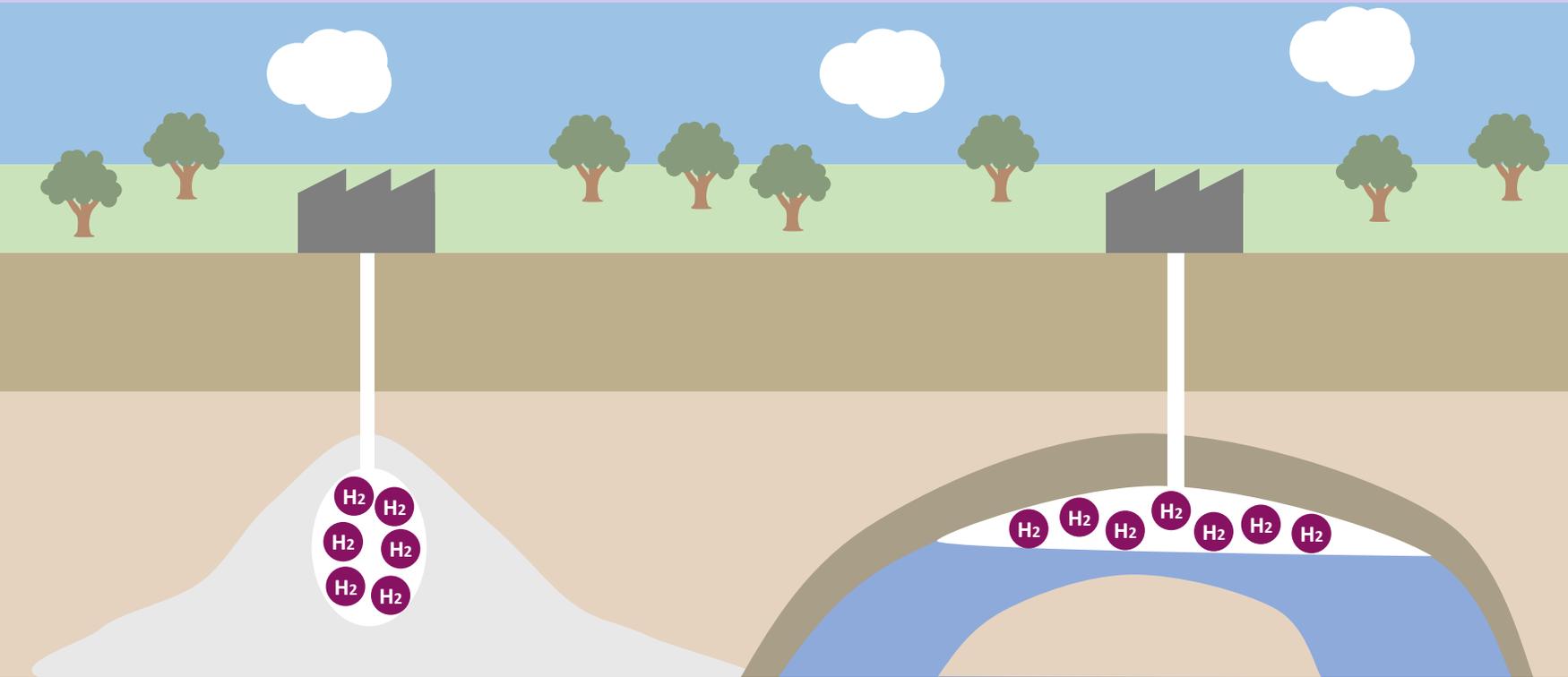
**Empêcher, détecter & rediriger** les fuites



> R&D en cours sur la **sécurisation maximale** du process

> Air Liquide → méthodes de **contrôle non destructives** (acoustiques)

# Le stockage géologique



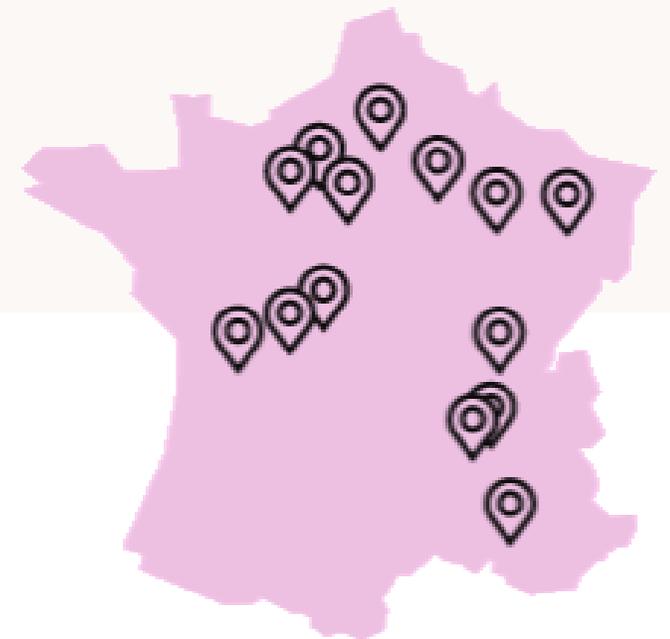
*Un enjeu clé pour la filière de l'hydrogène en France et dans le Monde*

## Cavité saline

Dissolution de cavité puis injection

## Aquifère profond

Profondeur 500 - 2000 m



*Carte des stockage géologiques de gaz naturels (Storengy)*



# LES UTILISATIONS POTENTIELLES

# La mobilité "lourde"

## Rail



Crédit : Alstom/Design & Styling

**ALSTOM**

## Aérien



Crédit : Airbus

**AIRBUS**

## Routier (transport de personnes)



Crédit : Safra

Safra

## Routier (transport de marchandises)



Crédit : Mercedes-Benz

 Mercedes-Benz

# La mobilité "légère"

## VU



Crédit : Renault

**Renault  
Group**

## VUL



Crédit : Renault

**Renault  
Group**

## SPORT



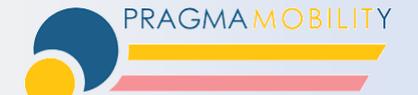
Crédit : GCK

 **motorsport**

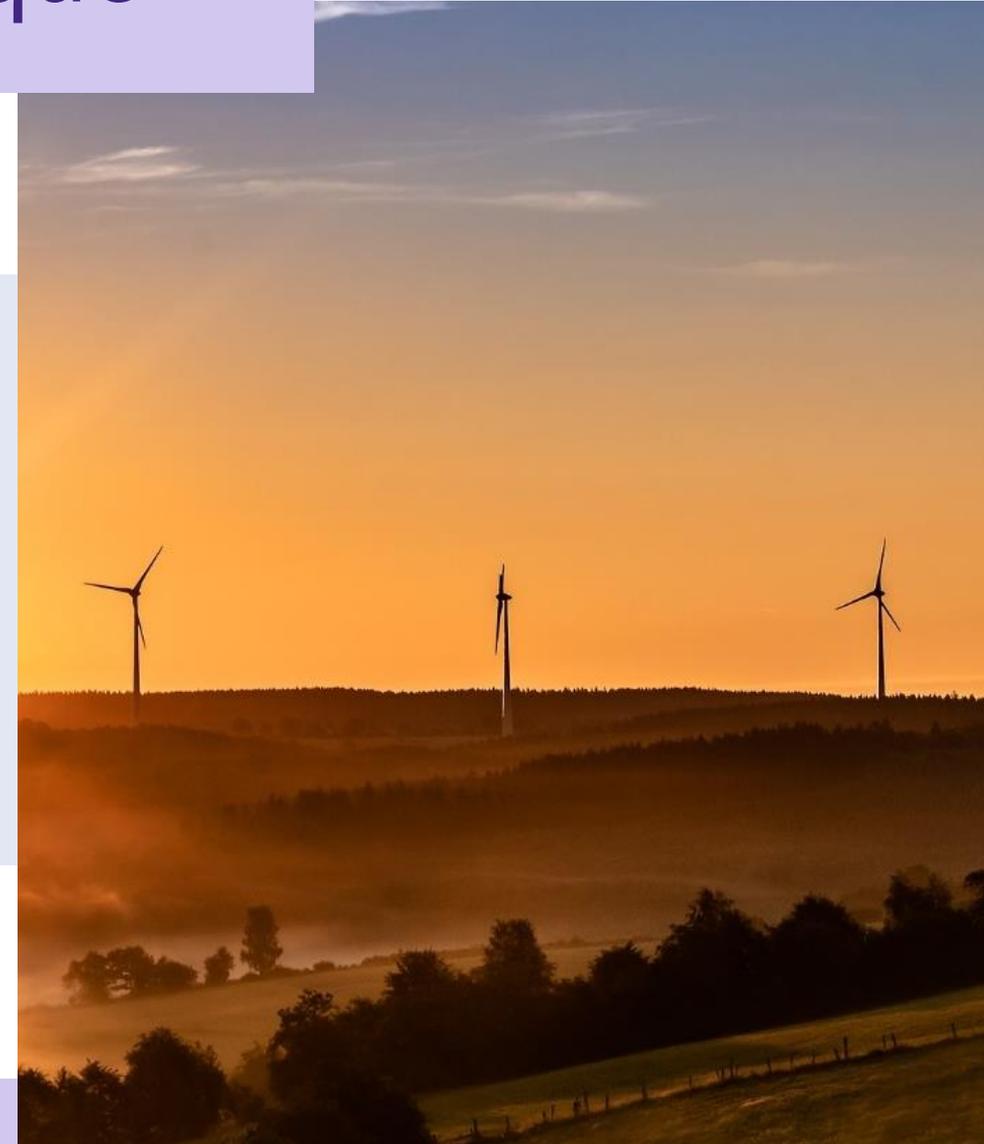
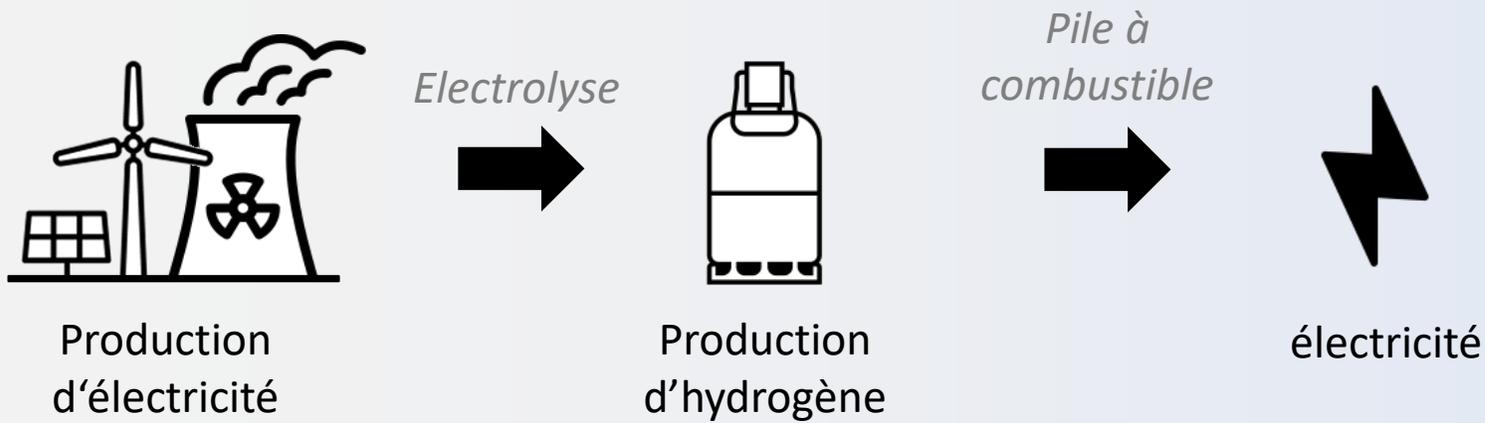
## DOUCE



Crédit : Pragma

 **PRAGMA MOBILITY**  
Move As You Are

# Le stockage de l'énergie électrique



> Double conversion associée à une **déperdition énergétique** de l'ordre de **70%** (20% électrolyse, 50% pile à combustible)

# L'hydrogène stationnaire

## BATIMENT



**essor**  
GROUPE

## GROUPE



**H2SYS**  
Hydrogen to system

## TORCHE



 **bulane**

## CHAUDIÈRE



# Autres utilisations (non exhaustif)



**Élimination** du soufre des hydrocarbures



**Réactif** industriel (textile, électronique...)

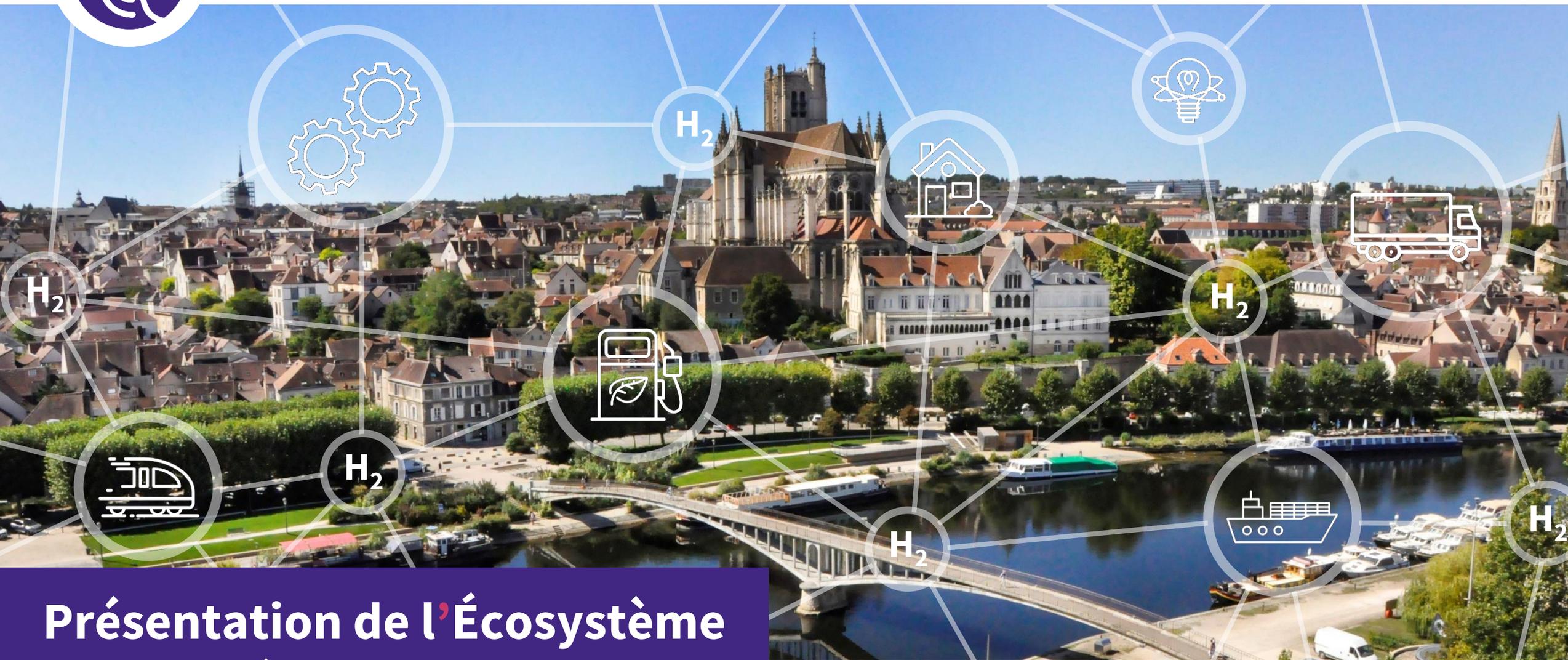


**Carburant** pour les lanceurs spatiaux





communauté de l'auxerrois



# Présentation de l'Écosystème Hydrogène de l'Auxerrois

# Intérêt de l'hydrogène



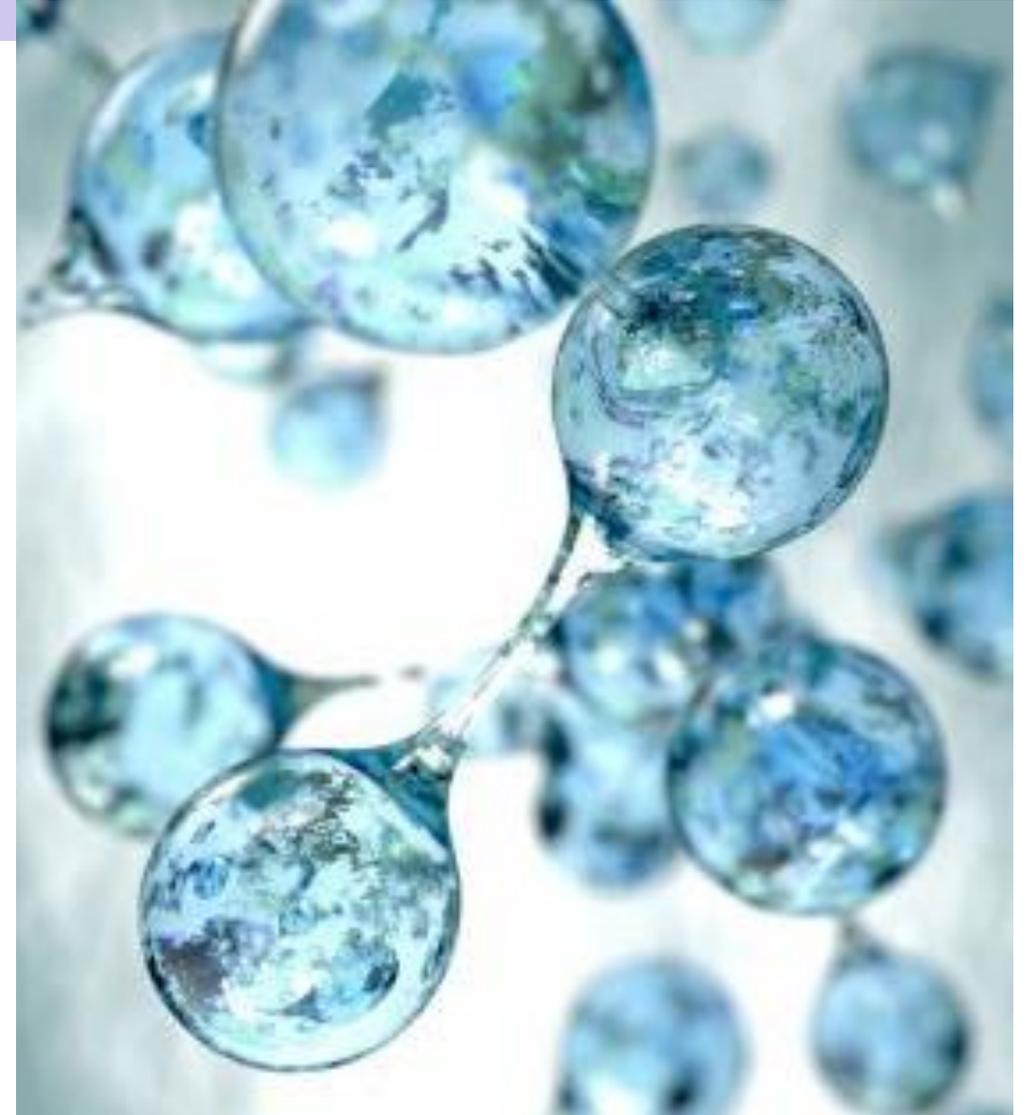
**Alternative décarbonée** aux énergies fossiles  
*énergies électrique ou thermique*  
> *Notamment en écomobilité lourde*



Contribution à l'**autonomie énergétique**  
*stockage des énergies renouvelables*  
> *Aide à l'autoconsommation pour les bâtiments*



Développement **économique & réindustrialisation**  
*structuration de la filière*  
> *R&D, startup, industrie, formation*





MOBILITÉ



- Transport : 31% des émissions de GES en France\*
- La moitié proviennent des utilitaires et des véhicules lourds
- Nécessité de décarboner le secteur du transport

*\* CITEPA - Rapport Secten 2020, Chiffres clés ADEME 2018*

# TRANSPORT VOYAGEURS

Safra

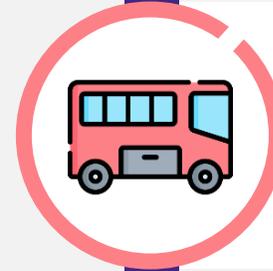


## Station



Station 1MW (400 Kg H2/j)  
Depuis Oct. 21  
2<sup>nd</sup>e phase envisagée  
3 MW (1 200 kg H2/j)

5 bus SAFRA Businova en 2021  
Obj. 100% de la flotte  
Construction d'un dépôt ATEX

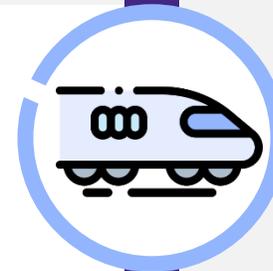


## Bus

**ALSTOM**  
• mobility by nature •



## Trains



3 TER ALSTOM  
Mise en service 2026

### Soutien de financement





Inauguration de la station AuxHyGen le 13 Octobre 2021

# TRANSPORT MARCHANDISES



© Renault Group

Accompagnement des entreprises qui souhaitent convertir leurs véhicules utilitaires légers



**VUL**

**PL**



Accompagnement des acteurs logistiques qui souhaitent convertir leur flotte de poids lourds

La CAA est engagée sur la conversion ou l'achat d'une première benne à ordures ménagères



**BOM**

*Soutien de financement*



**RÉGION  
BOURGOGNE  
FRANCHE  
COMTE**

© Hyundai Group



# RETROFIT



© H2mobile.fr

Développement d'un pôle de retrofit à Auxerre (R&D, production, formation)



## Pôle retrofit

## Atelier



Implantation d'une unité régionale de retrofit de véhicules (poids lourds, bus...)



© Transdev

Accueil des startups et développement d'un centre de R&D



## R&D

*Soutien de financement*



RÉGION  
BOURGOGNE  
FRANCHE  
COMTE



STATIONNAIRE



- Résidentiel + tertiaire : 18% des émissions de GES en France
- L'hydrogène stationnaire : une alternative pour décarboner ce secteur



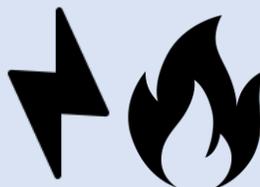
Production  
d'électricité  
renouvelable

*Electrolyse  
de l'eau*



Stockage  
d'hydrogène

*Pile à  
combustible*



Restitution  
d'énergie



**>> Travail en cours <<**

*(étude, POC, passage à l'échelle)*



# FORMATION

# FORMATION



Technicien de maintenance  
Option hydrogène



Formation  
continue

**BTS**



BTS technicien de  
maintenance option  
hydrogène

Master QHSE  
Option hydrogène



**BAC+5**



*Travail en cours*

**Ingénieur**



École d'ingénieur  
automobile



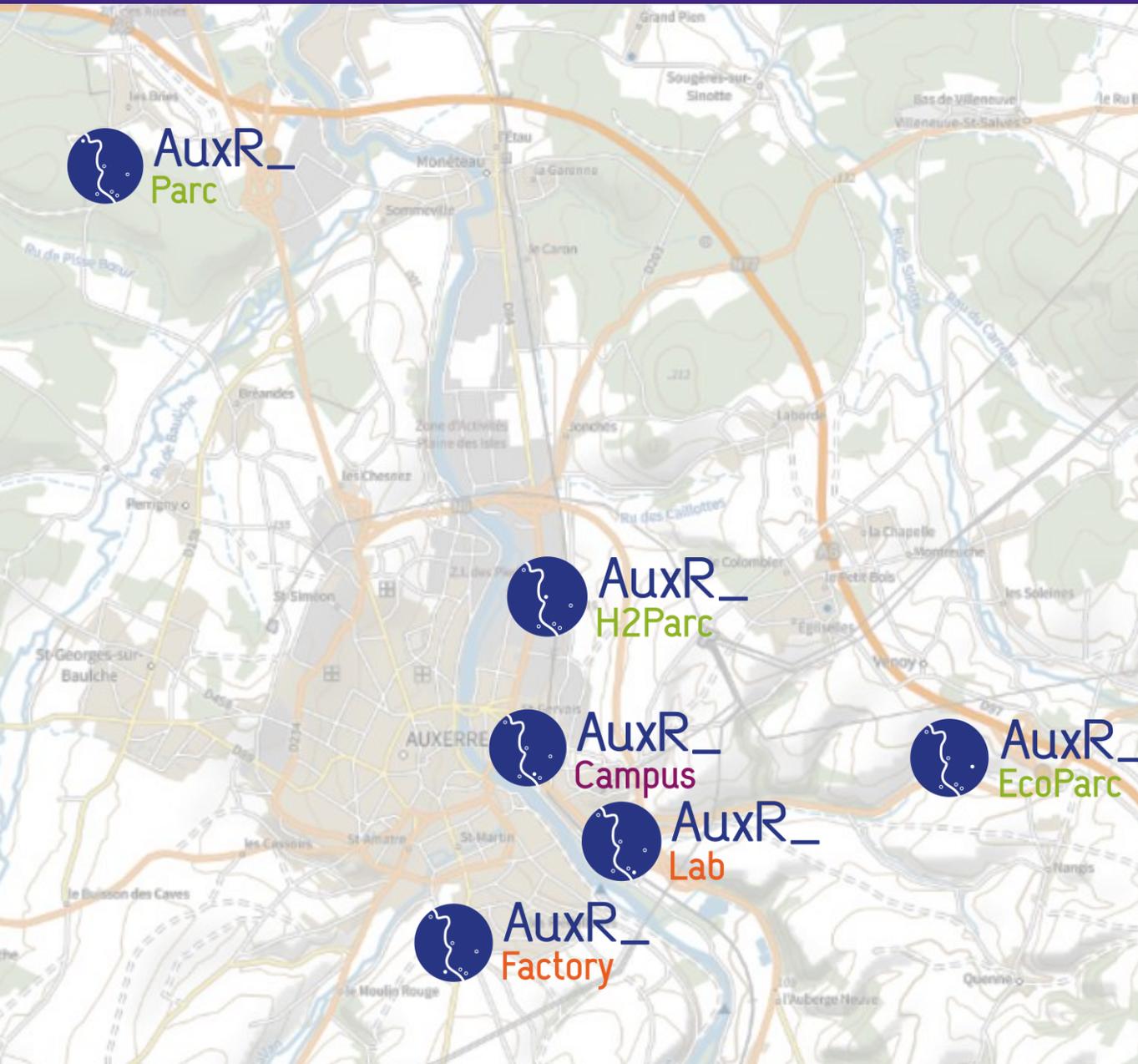
AUXR\_GREEN LAB

## ” Développer le territoire par l’innovation

AuxR\_Green Lab permet la mise en commun des compétences et des moyens autour de l’innovation, de la transition écologique et du déploiement de la filière hydrogène (universités, industriels, startups, laboratoires, partenaires économique, formation...)



# Sites technopolitains & ZAE thématiques



## 3 sites technopolitains

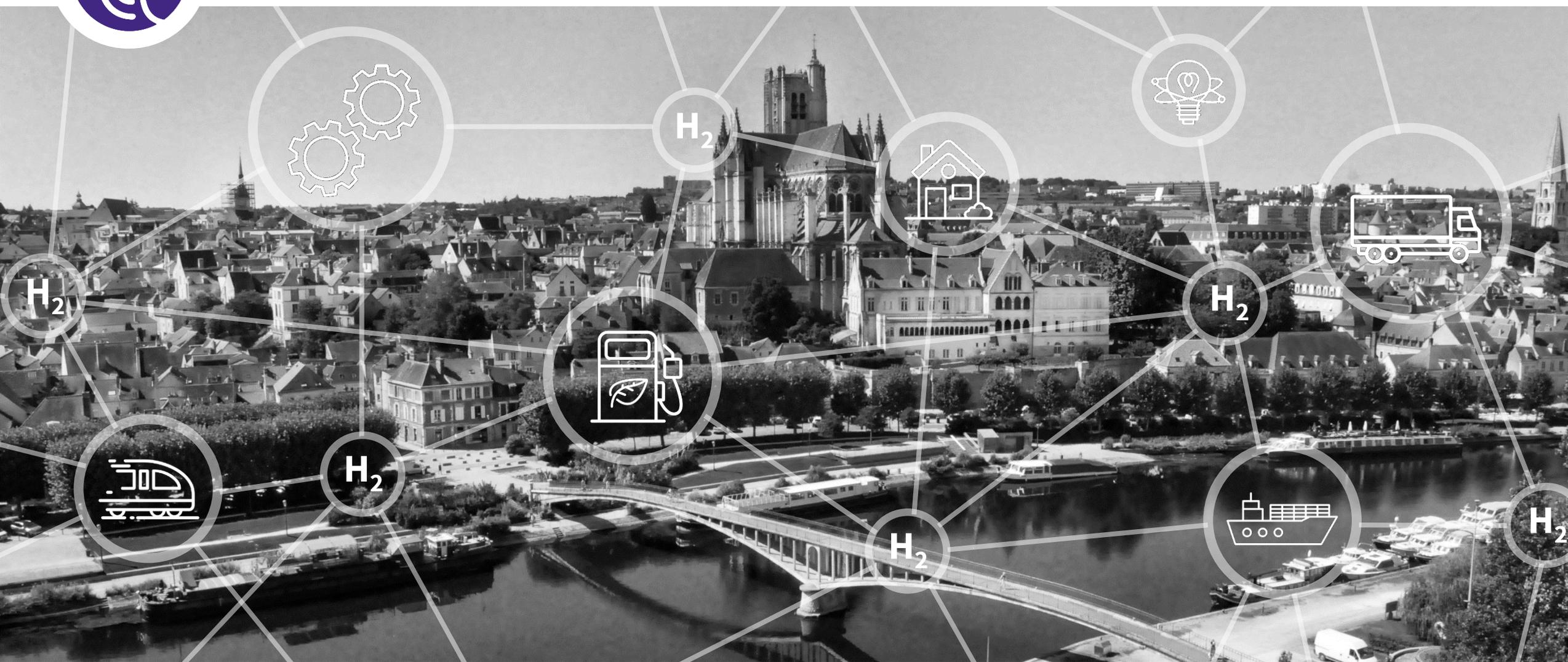
- **AuxR\_Lab** : Incubateur de startup
- **AuxR\_Factory** : Fablab / prototypage
- **AuxR\_Campus** : Formation

## 3 ZAE thématiques

- **AuxR\_Parc** : logi-industrie
- **AuxR\_Ecoparc** : valorisation des déchets
- **AuxR\_H2Parc** : filière hydrogène



communauté de l'auxerrois



# Contact



**Emmanuel JOBARD**



*Chargé de mission développement économique  
Chef de projet écosystèmes énergétiques*



emmanuel.jobard@auxerre.com



06 33 77 96 47