

## Produire l'hydrogène

**A partir de ressources fossiles : 96%** de la production mondiale actuelle

Méthode	Vaporeformage de méthane	Oxydation partielle (coupes pétrolières lourdes, charbon...)
Production mondiale	49%	29% (pétrole) + 16% (charbon)
Etape 1	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$	$C_nH_m + (n/2)O_2 \rightleftharpoons nCO + (m/2)H_2$
Etape 2	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ Réaction totale qui produit du $CO_2$ : méthodes carbonées.	
Etape 3	Traitement nécessaire : éliminer le $CO_2$ et le $CO$ résiduels	
Rendement global	82%	67%
Prix de l' $H_2$ (2008-2014)	13,4€/GJ	13,8€/GJ

Prix du méthane : 7,25€/GJ  
Prix de l'électricité : 18,37€/GJ

**En exploitant de l'hydrogène natif provenant du sous-sol ?**

Localisations	- Ronds de sorcières dans les bassins sédimentaires : USA, Brésil, Russie, Mali... - Dorsales océaniques : 50% à 70% des rejets des événements hydrothermaux
Origines	- Diagenèse : oxydation des ions $Fe^{2+}$ par l'eau de pluie ou l'eau de mer - Radiolyse : désintégration des molécules d'eau par radioactivité naturelle
Ordres de grandeur des flux à la surface	- Bourakebouguou, Mali : 1300 m <sup>3</sup> /jour (1 km de diamètre) - Un rond de sorcière au Brésil : 300 m <sup>3</sup> /jour (300 m <sup>2</sup> ) - Un événement hydrothermal : ~5-10 Mm <sup>3</sup> /an
Pour obtenir 70Mt d'hydrogène natif	- Soit exploiter 95000 km <sup>2</sup> de ronds de sorcières terrestres (15% France) - Soit exploiter 50000 km de dorsales océaniques en offshore
Points positifs	- Les flux ne baissent pas, la production souterraine semble être continue. - Il existe des roches couvertures et des réservoirs, malgré les fuites importantes
Points négatifs	- Seule l'exploitation terrestre paraît envisageable, mais reste néanmoins difficile. - L'hydrogène natif est très loin de pouvoir assurer à lui seul la demande mondiale

**Par électrolyse : 4%**

Réaction	$H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2}O_2$
Rendement global	70%-85%
Remarque	Si l'électricité est décarbonée, cette méthode l'est.

Il est impératif d'abandonner les méthodes de production carbonées pour que le choix de l'hydrogène ait un sens. De plus, on ne peut pas compter sur l'hydrogène natif pour décarboner la production mondiale.

## Quels objectifs ?

L'Europe se fixe comme objectif que 25% de son approvisionnement énergétique soit assuré par l'hydrogène en 2050. Cela équivaut à 681 centrales nucléaires uniquement pour cette filière, sachant qu'il y en a actuellement 126 en Europe.

	En Europe	Dans le monde
Production d'hydrogène en 2020 (en MTONnes)	8,8	70
Production d'hydrogène souhaitée en 2050 (en MTONnes)	100	X

Pour atteindre ses objectifs, l'Europe doit multiplier par 11 sa production d'hydrogène entre 2020 et 2050, et puisque seulement 4% de l'hydrogène est produit par électrolyse, il faudrait que l'Europe multiplie par 275 sa production d'hydrogène par électrolyse.

## Stocker l'hydrogène

**Problèmes pour le stockage :** le dihydrogène est volumineux, inflammable en présence de dioxygène, et sa petite taille lui permet de passer à travers des cuves en acier.

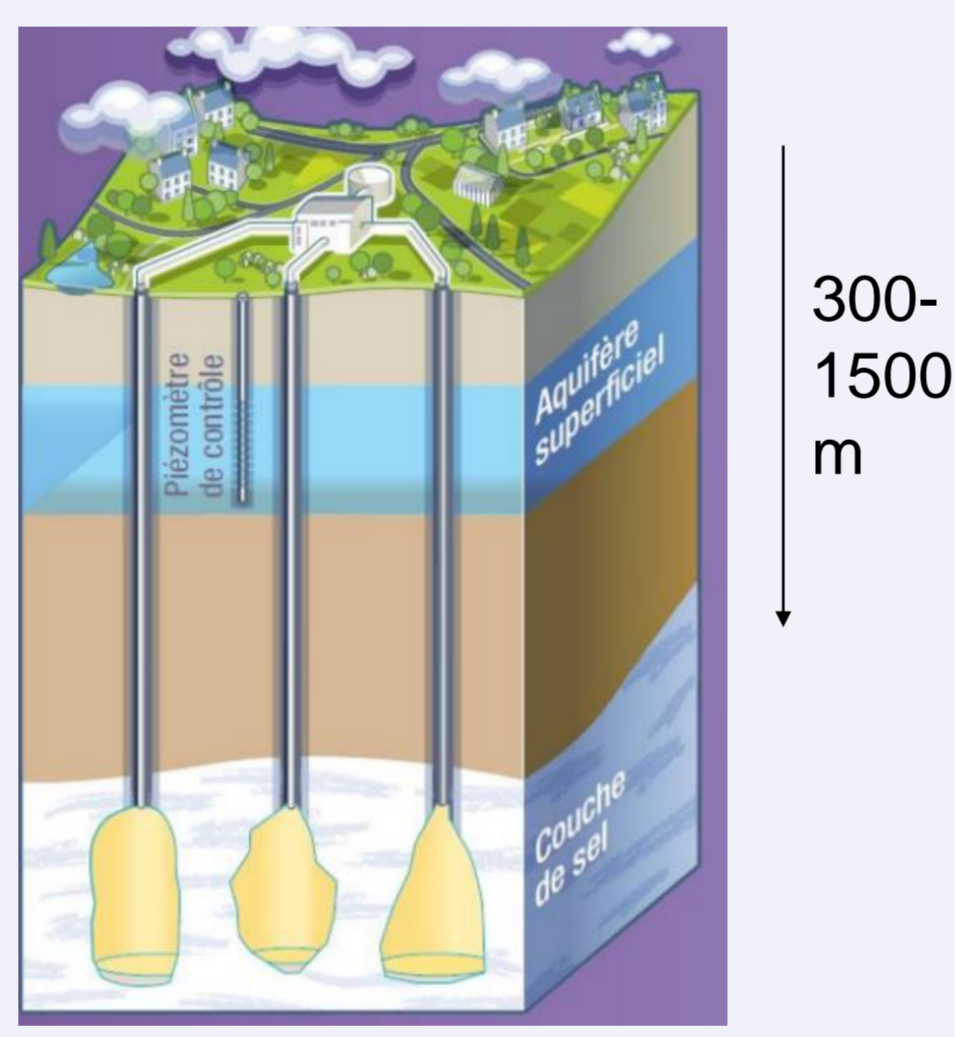


**Différentes techniques de stockage :**

*Sous forme liquide : A -253 degrés, mais cette méthode polluante et coûteuse est surtout réservée pour de la technologie de pointe comme la propulsion spatiale.	*Transformation du dihydrogène en d'autres gaz plus faciles à stocker comme le méthane ou l'ammoniac mais cela réduit le rendement énergétique.
*Sous forme solide en l'associant à d'autres composés grâce à des mécanismes d'adsorption ou d'absorption. Cependant seule une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, le rapport du poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.	*Sous forme gazeuse en le plaçant sous très haute pression jusqu'à 700 bars. C'est la solution la plus prometteuse. On peut utiliser des réservoirs adaptés ou stocker le dihydrogène en souterrain.

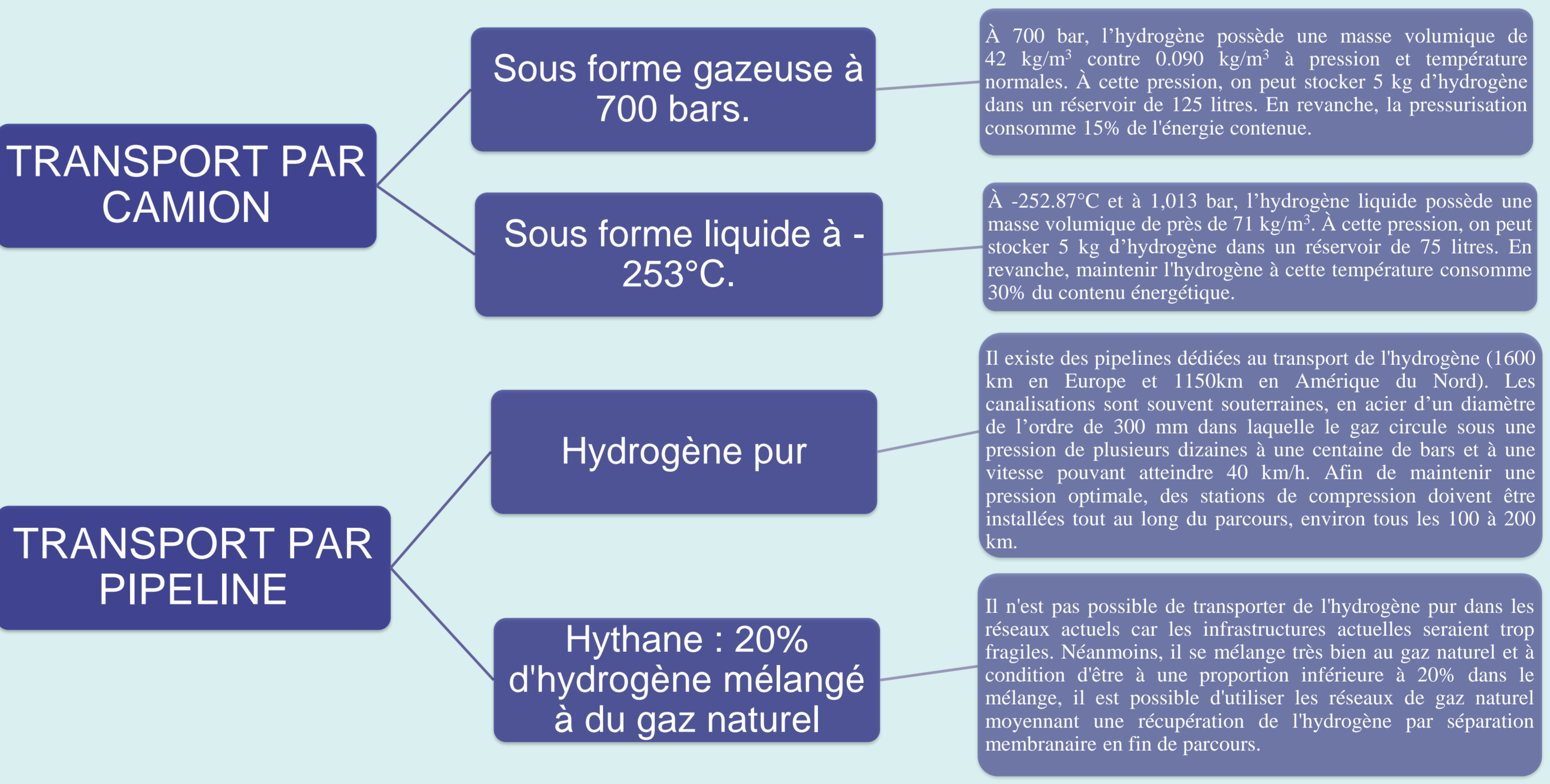
### Stockage souterrain

Les cavités salines sont retenues pour le stockage de l'hydrogène, car la dissolution du sel permet de créer des grandes cavités pouvant atteindre plus d'un million de mètres cubes de volume, la perméabilité pratiquement nulle du sel assure un confinement étanche du stockage, et il n'y a pas les interactions entre l'hydrogène et les minéraux ou micro-organismes présents dans les milieux poreux. Si les caractéristiques physiques et structurales de l'hydrogène impliquent un risque de fuite plus élevé pour un stockage d'hydrogène que pour d'autres gaz, des exemples d'utilisation des cavités salines par l'industrie chimique pour stocker de l'hydrogène attestent bien du caractère viable de cette solution. De plus, les 78 cavités salines présentes en France permettraient de stocker les quantités d'hydrogène prévues par les objectifs européens.



Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement produit à proximité des lieux où il est utilisé, mais cela pourrait changer à l'avenir, car les volumes de production et les distances de transport devraient augmenter. Or, en raison de sa très faible densité et d'une propension à fissurer les métaux, l'étape de transport est source de complications et de pertes importantes d'énergie et présente donc un enjeu crucial pour la filière hydrogène autant du point de vue du coût des infrastructures que du rendement énergétique. En bref, le transport de l'hydrogène est une technologie que l'on maîtrise et il existe déjà d'importants réseaux de pipelines dans le monde. En revanche, le rendement et le coût du transport resteront un frein important si la recherche ne développe pas de nouvelles solutions.

## Transporter l'hydrogène

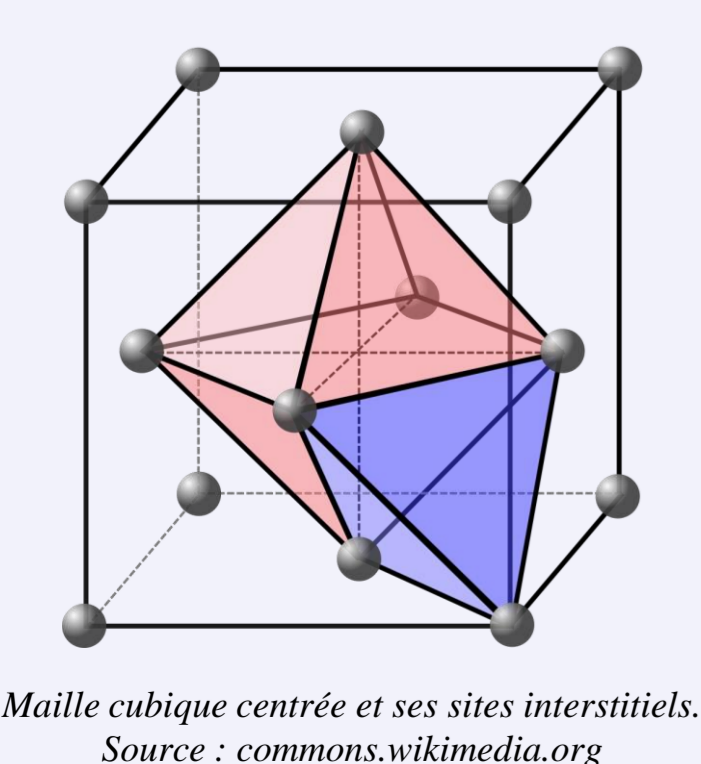


## Quels verrous ?

En dépit des espoirs que suscite l'hydrogène pour la décarbonation de certains secteurs d'activité tel les transports ou pour son potentiel apport aux énergies renouvelables, son déploiement à grande échelle n'est toujours pas assuré. En effet, l'hydrogène fait face à différents verrous que la recherche doit aider à surmonter.

### Fragilisation

À cause de sa petite taille, la molécule de dihydrogène peut facilement se dissoudre dans les métaux, ce qui a pour effet de les rendre plus cassants, complexifiant ainsi son transport et son stockage.



Les aciers ayant un maillage cubique centré, l'hydrogène peut s'insérer dans des sites interstitiels. Ces derniers sont de deux types, tétraédriques ou octaédriques. Le consensus semble s'être établi en faveur de l'occupation des sites tétraédriques.

### Concurrence

En tant que vecteur énergétique, l'hydrogène est en concurrence avec les batteries électriques. Les batteries sont plus économiques mais leur densité énergétique les restreint à des usages limités. L'hydrogène tire son épingle du jeu pour les usages nécessitant de grands stockages.

	Batterie	Hydrogène
Stockage électrique	Batterie	Hydrogène
Densité énergétique (kWh/kg)	< 0,5	33
Rendement	supérieur à 80%	entre 30% et 50%
Secteurs d'activité	voitures, petites à moyennes installations d'ENR...	poids lourds, avions, grandes installations d'ENR...

### Compétitivité

Les principaux concurrents de l'hydrogène dans le secteur du transport et celui du bâtiment sont respectivement le pétrole et le gaz naturel. On compare ici les prix de production de l'hydrogène, selon son mode de production, avec celui de ses concurrents.

Produit	Hydrogène par reformage (sans CCS)	Hydrogène par électrolyse propre	Pétrole (essence)	Gaz naturel
Prix (en ct.€/kWh)	5,0	15,0	3,0	1,5

Alors que les prix de production du pétrole et du gaz avoisinent les 2 centimes par kWh, celui de l'hydrogène atteint au mieux 5 centimes par kWh mais n'est alors plus décarboné (reformage). Les procédés de production de l'hydrogène ne sont aujourd'hui pas assez matures pour être compétitifs..

