

## TRANSPORT ET STOCKAGE DE L'HYDROGENE SOUS FORME LIQUIDE

**Coordinateurs :** Elise El Ahmar (CTP) et Faouzi Hadj Hassen (Géosciences)

**Centres de recherche concernés :** Centre Thermodynamique des Procédés (CTP) et Centre de Géosciences

**Lieu :** 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau, France

### RESUME

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers. Combiné à d'autres éléments, il est nécessaire de l'extraire de ces composés pour obtenir le dihydrogène  $H_2$ . Il constitue un vecteur énergétique qui peut être stocké et utilisé ensuite dans de nombreuses applications industrielles. De sa production jusqu'à son stockage et ses différentes utilisations, les élèves seront amenés à découvrir la molécule  $H_2$  sous sa forme gazeuse et liquide. A l'heure des préoccupations environnementales, cette molécule pourrait bien, à terme, jouer un rôle prépondérant dans le paysage énergétique futur.

### 1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

De tous les éléments chimiques, l'hydrogène est le plus simple. Potentiellement inépuisable et non émetteur de gaz à effet de serre, il n'est pas une source d'énergie mais un "vecteur énergétique" : il doit être produit puis stocké avant d'être utilisé. L'hydrogène pourrait jouer à l'avenir un rôle essentiel dans la transition énergétique en permettant de réguler la production d'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes.

#### 1.1. Production de l'hydrogène

L'hydrogène est produit par la séparation d'éléments chimiques dont l'atome H est un composant et par la mobilisation d'une source d'énergie.

- La principale filière de sa production utilise des composés organiques principalement constitués d'hydrogène et de carbone, comme le gaz naturel, le charbon ou la biomasse.
- La deuxième filière produit de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Elle utilise soit un courant électrique pour l'électrolyse, soit une succession de réactions chimiques (cycles thermochimiques) qui permettent de "casser" les molécules d'eau afin d'obtenir de l'hydrogène.
- Une autre filière utilise la lumière du Soleil. Cette méthode de production d'hydrogène est encore au stade de la recherche : des études sont menées en laboratoire pour produire de l'hydrogène grâce à des algues microscopiques ou des bactéries, par photosynthèse.

Plus de 95% de la production d'hydrogène est encore issue d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon). On appelle "hydrogène bas carbone" l'hydrogène produit grâce à une source d'énergie renouvelable, nucléaire ou par vaporeformage de gaz naturel si le procédé est associé à une unité de captage, stockage et valorisation du  $CO_2$  (Figure 1).

#### 1.2. Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz dont le volume massique est très important ; il faut donc utiliser différentes techniques pour en stocker des quantités utilisables :

- *Stockage à haute pression sous forme gazeuse* : La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression. Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de  $42 \text{ kg/m}^3$  contre  $0,09 \text{ kg/m}^3$  à pression et température normales. Parmi les différentes méthodes, le stockage souterrain en cavités salines lixiviées ou en cavités minées constitue une solution particulièrement intéressante en raison de sa souplesse d'utilisation. De grandes quantités d'hydrogène peuvent être ainsi stockées en toute sécurité à des pressions élevées.

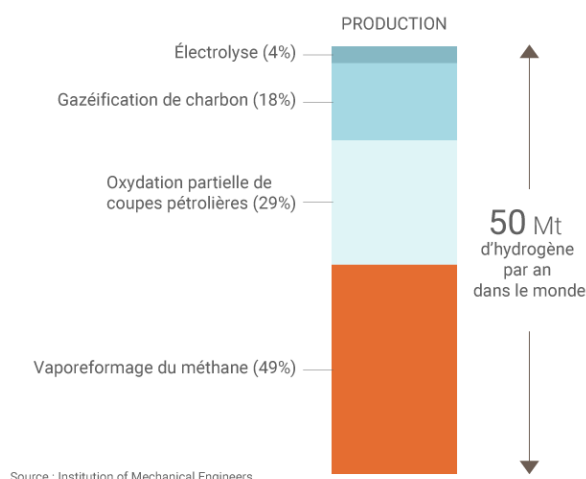


Figure 1 : Différents procédés de production de l'hydrogène

- *Stockage cryogénique sous forme liquide* : Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à très basse température. L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit. Ainsi, à  $-252,87^{\circ}\text{C}$  et 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de  $71 \text{ kg/m}^3$ . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. Avec une telle quantité d'hydrogène embarquée, un véhicule équipé d'une pile à combustible pourrait parcourir une distance de 500 km en toute autonomie. Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés thermiquement.
- *Stockage massique sous forme d'hydrures* : Le stockage de l'hydrogène sous forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau. Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates (complexe Al-H). Cependant, une très faible masse d'hydrogène peut être stockée actuellement dans ces matériaux, ce qui représente le principal inconvénient de cette technologie (rapport masse d'hydrogène/masse totale du réservoir de 2 à 3% au maximum).

### 1.3. Captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub>

La production de l'hydrogène par électrolyse à partir d'une électricité bas carbone fournie par de l'énergie nucléaire ou renouvelable est actuellement beaucoup plus onéreuse que celle du vaporeformage de gaz naturel. Dans une optique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la poursuite de ce dernier mode de production d'hydrogène doit s'accompagner nécessairement de moyens de captage du CO<sub>2</sub> qui est valorisé dans l'industrie ou séquestré dans des aquifères salins profonds.

Historiquement, le CO<sub>2</sub> est utilisé pour la production d'urée (57%) et pour la récupération assistée de pétrole (34%). Le restant (9%) est majoritairement employé pour des applications dans l'agro-alimentaire et la métallurgie (AIE, 2018). Mais avec le déploiement des technologies de captage, de nouvelles voies de valorisation du CO<sub>2</sub> émergent avec des débouchés pour les industriels tels que l'utilisation du CO<sub>2</sub> comme matériaux de construction ou comme substitut de ressources fossiles pour la production de matières plastiques et de carburants synthétiques, etc...

### 1.4. Marché de l'hydrogène

L'hydrogène en tant que vecteur énergétique peut être utilisé dans de nombreuses applications : la production d'électricité (Power to Power), le transport (Power to Mobility), l'industrie (Power to Industry) et le réseau de gaz naturel (Power to Gaz). La Figure 2 donne une illustration de la filière de l'hydrogène gazeux avec en amont, la production par électrolyse de l'eau, en aval, les quatre applications industrielles et au centre, le stockage en cavités salines.

Dans l'industrie, l'hydrogène est utilisé pour ses propriétés chimiques, en particulier dans les usines d'ammoniac (~50% de la consommation mondiale) et dans les raffineries de pétrole (désulfuration d'essence et de gazole, production de méthanol...).

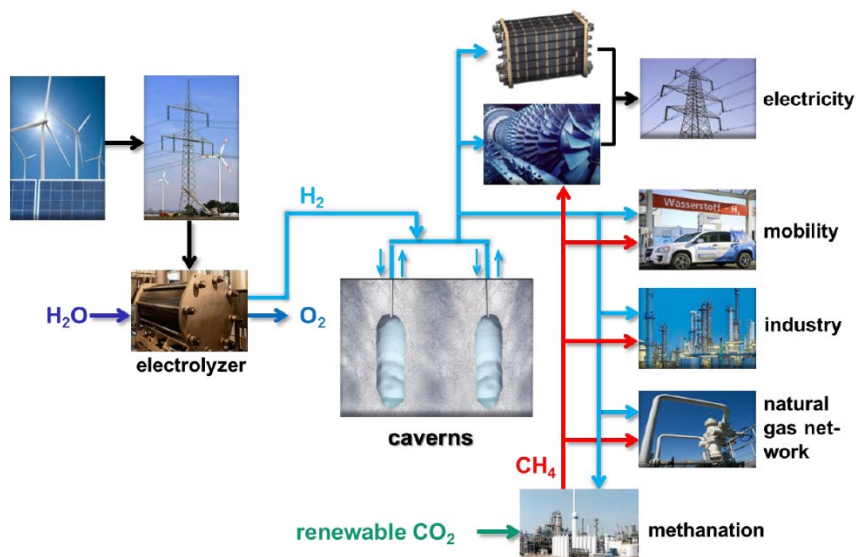


Figure 2 : Filière de l'hydrogène gazeux : production par électrolyse, stockage en cavités salines et domaines d'application (source Solution Mining Research Institute, SMRI)

## 2. OBJECTIFS ET ORGANISATION

Le MIG se propose d'étudier l'hydrogène sous ses deux formes gazeuse et liquide depuis la phase de production en passant par le transport, le stockage et l'utilisation. Il s'agit de faire une évaluation technicoéconomique comparative, intégrant les normes du développement durable, dans le but de mettre en évidence la filière la plus intéressante à déployer. Compte tenu de l'étendu du sujet, seules les deux applications majeures concernant la mobilité et l'industrie seront considérées.

Le travail commence par l'analyse du contexte général des énergies renouvelables et la place qu'occupe l'hydrogène dans la transition énergétique. Cette analyse permettra de définir les configurations à étudier plus en détail pour chacune des deux applications industrielles envisagées. Le premier volet est technique et concerne la production de l'hydrogène par vaporeformage du gaz naturel et par électrolyse de l'eau, le captage du CO<sub>2</sub>, la liquéfaction et le transport de l'hydrogène, le stockage souterrain sous formes gazeuses et liquide, les interactions entre les installations de surface et les structures souterraines et enfin le bilan énergétique de chaque système. Le second volet porte sur les aspects réglementaire, sécuritaire, environnemental, social et économique du projet.

Le MIG sera réalisé en 3 semaines bloquées du lundi 14 novembre au vendredi 02 décembre 2022. La première semaine sera consacrée à l'acquisition des connaissances préalables sur les principaux thèmes à traiter en s'appuyant essentiellement sur des conférences et des visites d'entreprises et de chantiers ainsi que sur les échanges avec les acteurs industriels et institutionnels. Au cours des deux autres semaines, les élèves réaliseront des "mini-projets" dans le but d'appréhender de manière quantifiée la complexité des enjeux et des problèmes posés et de proposer des solutions ou des pistes de réflexion.

### 2.1 Contenu des mini-projets

Le travail sera organisé autour de 6 mini-projets menés par petits groupes de 5 à 6 élèves qui les amèneront à rassembler les différents éléments de la réflexion en vue d'une synthèse générale.

#### Mini-projet 1 : H<sub>2</sub> et la transition énergétique

Ce mini-projet commence par décrire le contexte actuel de la transition énergétique et la place de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. Les données disponibles sur la production, le transport, la liquéfaction, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène dans sa forme gazeuse et liquide seront rassemblées en vue d'établir les configurations à étudier dans le MIG. Une configuration est définie par un besoin d'énergie de l'application considérée (mobilité et/ou industrie) et un cycle d'exploitation de l'hydrogène pouvant être quotidien, hebdomadaire, mensuel voire saisonnier.

#### Mini-projet 2 : Production, transport et liquéfaction de H<sub>2</sub>

Les deux modes de production de l'hydrogène à étudier sont le vaporeformage du gaz naturel avec captage et valorisation du CO<sub>2</sub> ainsi que l'électrolyse de l'eau. Le transport et la liquéfaction de l'hydrogène seront traités en mettant en avant les enjeux et les verrous technologiques et en procédant à une analyse comparative entre les formes gazeuses et liquide de l'hydrogène.

#### Mini-projet 3 : Stockage gazeux de l'hydrogène en cavités salines lixiviées et en cavités minées

La première tâche dans ce mini-projet consistera à expliquer les raisons du stockage de l'hydrogène gazeux dans ces deux types de réservoirs et les conditions requises dans chaque cas. La création de la cavité par lessivage, dans les formations salines, et par creusement minier, dans les roches compétentes, sera étudiée avec des outils simples d'ingénieurs en utilisant les paramètres établis dans les configurations envisagées. Contrairement à la cavité saline lixiviée qui est parfaitement étanche, la cavité minée nécessite la mise en place d'un revêtement qu'il faut dimensionner pour assurer la stabilité et l'étanchéité du stockage. Les simulations numériques des scénarios d'exploitation des deux types de stockages seront réalisées avec un logiciel dédié développé au centre de Géosciences. Ce logiciel permet d'assurer le couplage entre la thermodynamique de l'hydrogène et le comportement thermomécanique de la roche avec en particulier la prise en compte du fluage du sel. Une analyse comparative des deux types de stockage conclura les simulations effectuées.

#### Mini-projet 4 : Stockage liquide de l'hydrogène

La très basse température de l'hydrogène liquide impose la conception de réservoir assurant une isolation thermique totale par rapport à l'environnement. Cela peut se faire avec un réservoir à double coques métalliques séparées soit par un vide (réservoir prévu par Airbus pour l'avion hydrogène), soit par un matériau super isolant (réservoir enterré pour une station d'hydrogène liquide, Figure 3). C'est le second type de réservoir qui sera plus étudié avec des simulations numériques thermiques. Pour un stockage massif de l'hydrogène liquide en souterrain, deux options sont possibles : la réalisation d'une cavité minée avec un revêtement permettant à la fois d'assurer la stabilité, l'étanchéité et surtout l'isolation de la roche qui ne supporte pas ce niveau de température. L'autre solution consiste à congeler au préalable les terrains. La faisabilité de ces deux solutions seront examinées en s'appuyant sur les recherches et les expériences acquises dans le stockage du Gaz Naturel Liquéfié (GNL, Figure 3). Des simulations numériques simplifiées pourraient également être mises en œuvre.

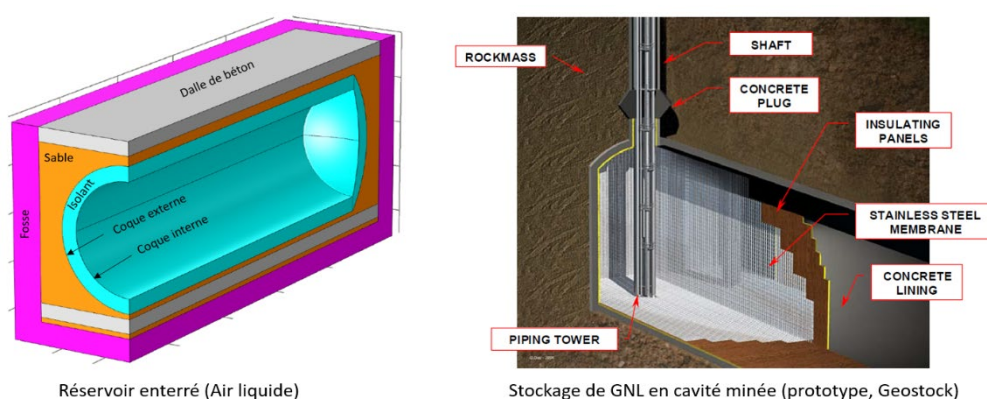


Figure 3 : Stockage de l'hydrogène liquide en réservoir enterré et en cavité minée

#### Mini-projet 5 : Cadre législatif, environnemental et social

Le volet réglementaire, environnemental et social revêt une importance capitale dans la réussite d'un tel projet. On commencera par rappeler la réglementation liée à ce type d'installation pour mener par la suite une étude sur ses impacts possibles sur l'environnement. Les aspects territoriaux concernant l'usage de l'hydrogène dans ses formes gazeuse et liquide seront pris en compte dans l'analyse globale de l'acceptabilité sociale en comparaison avec le gaz naturel. Pour donner un sens concret à ce projet, des sites potentiels en France seront proposés pour l'implémentation d'une installation d'hydrogène.

#### Mini-projet 6 : Bilan énergétique et évaluation économique

Un inventaire simplifié des équipements et des procédés à mettre en œuvre en surface sera effectué en relation avec les structures souterraines du stockage dans le but d'établir le bilan énergétique de chaque configuration envisagée. Les résultats obtenus permettront de procéder à l'évaluation économique des différentes configurations et à l'identification de la filière d'hydrogène la plus intéressante à déployer.

## 2.2. Organisation

La semaine 1 sera consacrée à l'acquisition des connaissances en s'appuyant sur les conférences et les visites effectuées ainsi que les échanges avec les acteurs industriels et institutionnels. Les élèves sont encouragés à poser leurs questions aux conférenciers.

En deuxième semaine, les quatre premières journées seront consacrées aux mini-projets 1 à 3, la dernière, à une synthèse des résultats des travaux réalisés ainsi qu'à la coordination des résultats en vue de la préparation des mini-projets suivants. En troisième semaine, les quatre premières journées seront

consacrées aux mini-projets 4 à 6, et la dernière, à la synthèse des travaux et à la préparation du rapport final du MIG.

### Semaine 1

Lundi 14/11 Ecole Paris Les Ulis	- Présentation du MIG - E. El Ahmar & F. Hadj-Hassen - Conférence sur la filière hydrogène – C. Werquin (France Hydrogène) - Visite de la société GTT (Electrolyse)
Mardi 15/11 Ecole Paris Rueil Malmaison	- Conférence sur l'hydrogène et le développement durable – C. Descamps-Large - Recherche documentaire - P. Nalon - Visite de la société Geostock (Ingénierie du stockage)
Mercredi 16/11 Loges en Josas	- Visite du centre de recherche d'Air Liquide (Leader mondial du gaz)
Jeudi 17/11 Etrez	- Visite du site de stockage de gaz en cavités salines de Storengy (Opérateur du stockage souterrain de gaz)
Vendredi 18/11 Stains	- Visite du centre de recherche d'Engie (Groupe mondial du secteur de l'énergie)

### Semaine 2

Lundi 21/11 Fontainebleau	Réalisation des mini-projets 1 à 3 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 22/11 Fontainebleau	
Mercredi 23/11 Fontainebleau	
Jeudi 24/11 Fontainebleau	
Vendredi 25/11 Fontainebleau	Synthèse des mini-projets 1 à 3 et restitution Coordination des résultats en vue des mini-projets 4 à 6.

### Semaine 3

Lundi 28/11 Fontainebleau	Réalisation des mini-projets 4 à 6 menés par groupes en parallèle. Compléments d'informations techniques et scientifiques par groupes de projet.
Mardi 29/11 Fontainebleau	
Mercredi 30/11 Fontainebleau	
Jeudi 01/12 Fontainebleau	
Vendredi 02/12 Paris	Synthèse des mini-projets 4 à 6 et restitution Préparation du plan du rapport final

## 2.3. Références

<https://www.airliquide.com/fr/groupe/activites/hydrogene>

<https://www.geostockgroup.com/>

<https://www.youtube.com/user/storengycom/videos>

<https://www.engie.fr/hydrogene/>

## 2.4. Contacts

### ☛ Dr. Elise El Ahmar

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines Paris

e-mail : elise.el\_ahmar@minesparis.psl.eu

Portable : + 33 6 88 08 58 81

### ☛ Dr. Faouzi Hadj-Hassen

Centre de Géosciences – Mines Paris

e-mail : faouzi.hadj\_hassen@minesparis.psl.eu

Portable : + 33 6 76 10 35 92