

INTRODUCTION

Le secteur des transports représente environ un quart des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial, décarboner le secteur de la mobilité est donc un enjeu majeur. L'hydrogène, gaz ayant une grande densité énergétique massique et dont la combustion ne produit que de l'eau semble apparaître comme pouvant être un atout. Cependant il n'est présent qu'en faible quantité à l'état naturel et sa production décarbonée est coûteuse en énergie. De plus, il entre en concurrence avec d'autres options pour décarboner le secteur des transports comme l'électrique, dont le développement s'intensifie massivement.

FRISE CHRONOLOGIQUE

Contexte. Crise pétrolière, pénuries de pétrole, préoccupations environnementales

Projets. Intérêt pour l'hydrogène à partir du charbon ou de l'électricité nucléaire pour le transport.

Contexte. Prise de conscience accrue du changement climatique.

Projets. Etudes sur l'hydrogène sur la capture et le stockage du carbone (CSC)

Contexte. Réémergence des préoccupations climatiques et du "peak oil"

Projets. espoirs de production d'hydrogène via des centrales nucléaires de nouvelle génération et séparation thermique de l'eau.

Contexte. Lutte contre le réchauffement climatique, baisse des coûts des énergies renouvelables.

Projets. Accélération des projets d'hydrogène vert mais confrontés à des défis d'infrastructures et des coûts élevés.

Contexte. Montée de projets pour l'hydrogène vert

Projets. Expansion des infrastructures et production d'hydrogène propre.

2030 : la production annuelle des électrolyseurs devrait atteindre **155 GW**

2035 : interdiction de la vente de véhicules neufs thermiques en Europe (mesure législative adoptée en 2022)

2040 : réduction de 90% des émissions de GES des camions neufs (par rapport à 2019) dans l'UE. **L'hydrogène est vu comme une solution pour les transports lourds et longue distance.**

1970s

Evènements clés.

- 1976 : l'International Journal of Hydrogen Energy.
- 1977 : programme de collaborations technologiques de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE).

Fin. Intérêt déclinant avec l'abondance des ressources en pétrole, la baisse du prix du pétrole et résistance au nucléaire.

1990s

Evènements clés.

- 1993 : programme japonais WE-NET de 4,5 milliards de JPY
- 1990s : des constructeurs automobiles présentent des voitures à hydrogène.

Fin. Le faible prix du pétrole empêche l'essor de l'hydrogène.

2000s

Evènements clés.

- 2003 : les Etats-Unis créent le **Partenariat International pour l'hydrogène et les piles à combustibles dans l'économie (IPHE)**.
- 2010 : intérêt qui diminue avec la baisse des inquiétudes sur le pic pétrolier, des incertitudes sur les politiques climatiques
- Évolution du coût du pétrole et du dihydrogène - aspect économique : hydrogène compétitif

2020-2025

Evènements clés.

- 2022 : demande mondiale d'hydrogène atteignant **95 millions de tonnes** mais reste concentré dans l'industrie.
- 2023 : la production d'électrolyseurs augmente mais seulement **0,7%** de l'hydrogène produit est à faible émission.

2025 – 2030

Evènements clés prévus.

- 2025 : réduction de 15% des émissions de GES des camions (par rapport à 2019) dans l'UE pour tous les véhicules neufs.
- 2026 : loi sur l'infrastructure hydrogène : soutenir le déploiement des infrastructures de recharge d'hydrogène, notamment des stations de ravitaillement pour les camions et les trains

ORGANIGRAMME DE LA MOBILITÉ HYDROGÈNE

Mobilité hydrogène

Motorisation

- Pile à combustible
- Moteur à combustion

Production

- Ressource naturelle
- A partir de gaz (CH4)
- Par électrolyse

Distribution

- Stations hydrogène
- Stockage de l'hydrogène

Élément chimique le plus abondant dans l'univers
Pas d'accumulation prouvée à l'heure actuelle

Reformage du méthane, fraction pétrolière, gazéification du charbon

Utilisation d'électricité décarbonée

Problème d'inertie du lancement hydrogène / Coût des stations ~ 1 et 2 millions d'euros / Problème de sécurité

Cryogénique / Gazeux / Refroidissement
Pipeline hydrogène + stockage dans les cavités salines

CONTEXTE HYDROGÈNE (1)

Environnement

- Pas de pollution** lors de l'utilisation d'hydrogène dans les transports
- Forte pollution dans la production d'hydrogène aujourd'hui** : 95% fossile aujourd'hui, ~ 2,3% des émissions mondiales de GES
- Classification de l'hydrogène** : **renouvelable** (électrolyse avec électricité renouvelable), **bas carbone** (avec captage et stockage du CO2 (CCS) ou avec électricité nucléaire) et **d'origine fossile** (sans CCS)
- Fuites d'hydrogène** : effet indirect, s'oxyde avec OH, présence moindre de OH dans l'atmosphère pour détruire les molécules de méthane : **1 t d'hydrogène rejetée = 13 t CO2eq**

Social

- Peur d'explosions et d'incendies** : molécule **incolore, inodore et non toxique** mais explosive au contact d'oxygène.
- Peur des restrictions** sur le mode de vie si il se développe ou plus généralement avec la transition énergétique
- Population opposée** au stockage de l'hydrogène vis à vis des risques
- Désinformation sur les réseaux sociaux** touchant en particulier la population qui ne conduit pas
- Formation d'un **débat idéologique très clivant** qui retarde les projets

CONTEXTE HYDROGÈNE (2)

Géopolitique

- Recherche **indépendance énergétique** par l'Europe et la France
- Compétition pour devenir un des leader mondial batteries électriques** entre la Chine et la Corée
- Conditions idéales** en Afrique du Sud pour développer hydrogène vert
- Lobbying des grands groupes pétroliers** : hydrogène comme solution miracle afin de retarder la transition énergétique car il est principalement d'origine fossile

Économie

- Coût élevé** de l'hydrogène par rapport aux sources d'énergie
- Stratégies de réduction basées sur **coopération internationale peu crédible**
- Problème de **rentabilité** chaîne globale d'hydrogène provenant de l'hydrolyse
- Nécessité de financer** l'installation de stations de recharge sur le territoire et la décarbonation de la production d'hydrogène à la fois

TABEAU COMPARATIF DES MOBILITÉS

		Avantages	Inconvénients
Hydrogène		Recharge instantanée, pas d'émissions	Coût, peu de stations, hydrogène 10x moins dense que hydrocarbure
		Grande autonomie (800 à 900 km), forte puissance motrice, pas d'émissions	Prix d'achat élevé, peu de stations
		Peu polluant	Technologie peu développée Coûts élevés, beaucoup de consommation d'énergie Surtout au stade de projet, problèmes de stockage de l'hydrogène
Electrique		Nombreuses stations de recherche, pas d'émissions	Faible autonomie (300 km en moyenne), temps de recharge élevé Minéraux polluants dans batterie
		Pas d'émissions	Autonomie limitée, peu de stations de recharge, coût 3x plus important que les camions diesels
		Peu polluante, pas de nécessité de nouvelles installations par rapport à l'hydrogène	Surtout au stade de projet, coûts élevés
Pétrole		Nombreuses stations de recharge, coût	Polluant, non conforme aux objectifs d'émission Interdit à la vente en Europe en 2025
		Prix plus faible, grande autonomie	Polluant, non conformes aux objectifs d'émission 40% de TER roulent au diesel en France
		Performant	Polluant, non conforme aux objectifs d'émission
		Faible coût	Polluant

AVANCÉES TECHNOLOGIQUES, MODÈLES, PRÉVISIONS

- Proposition de nombreuses variations dans le thème de l'avenir de l'hydrogène par le **modèle présenté par DNV**
- Augmentation drastique demande** : diversification des secteurs d'utilisation, intensification pour la mobilité
- Augmentation production hydrogène et diversification** pour plus de production propre par électrolyse notamment
- Augmentation coût production énergie fossile contrairement aux énergies bas-carbone** pouvant même devenir moins chères d'ici 2050
- Modèle discutable** car utilise des données provenant de multiples enquêtes concernant : science, statistique, paramètres économiques et sociaux même si DNV est reconnu pour sa fiabilité de ses prévisions

DÉVELOPPEMENT DE LA MOBILITÉ HYDROGÈNE EN EUROPE

France: objectif 2030

9 000 véhicules lourds à hydrogène
150 000 véhicules légers à hydrogène
12 TER hydrogène
6,5GW d'électrolyseurs

Projet "Hydrogen Corridor"
Gazoduc reliant l'Ukraine (producteur) et l'Allemagne (consommateur) d'ici 2030

1,225 km de longueur
144GWh/jours
1,0 à 1,5 millions d'euros d'investissement

Objectifs pour **réduire le coût de l'hydrogène**

Réutiliser les infrastructures dédiées au gaz
Mettre en place des **subventions**

DÉVELOPPEMENT DE LA MOBILITÉ HYDROGÈNE DANS LE MONDE

Circulation de **trains hydrogène**
Coradia illint en Europe et en Amérique

CHINE:

60% de la capacité mondiale de fabrication d'électrolyseurs
30% de la demande mondiale en hydrogène
1/4 du stock mondial de véhicules hydrogène

Corée: **39%** du stock mondial de véhicules hydrogène

CONCLUSION

L'hydrogène est un gaz présentant l'avantage d'avoir une combustion ne produisant que de l'eau, il est donc intéressant d'un point de vue environnemental. Cependant il est aujourd'hui produit à partir d'énergies fossiles, engendrant des émissions de CO2. Il présente également un coût élevé, bien que celui-ci puisse diminuer à l'avenir, et nécessite le déploiement d'infrastructures coûteuses. Il n'apparaît donc pas comme une solution facile à mettre en place, d'autant plus que les véhicules électriques sont en plein essor et apparaissent souvent comme une option plus intéressante, notamment économiquement, pour décarboner le secteur des transports. Cependant, toute option reste bonne à prendre et une diversification des énergies utilisées accélérera la transition.

SOURCES

IEA (2024), *Global Hydrogen Review 2024*, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, Licence: CC BY 4.0
« Agir pour accélérer le développement de l'hydrogène ». 2024. France Hydrogène. 10 décembre 2024. <https://www.france-hydrogene.org/>.
« Hydrogen Forecast to 2050 ». s. d. DNV, 12 décembre 2024, <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>.
<https://abgi-france.com/hydrogene-dans-le-transport-motorisation-thermique-vs-pile-a-combustible/>
<https://www.dnv.com/news/hydrogen-at-risk-of-being-the-great-missed-opportunity-of-the-energy-transition-226628/>

PSL
RESEARCH
UNIVERSITY

www.mines-paristech.fr