

H2-B1 : INTRODUCTION À L'ÉNERGIE HYDROGÈNE ET À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les apprenants devraient être capables de :

1. Expliquer le rôle de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique ;
2. Décrire le rôle de l'hydrogène dans la transition vers une énergie propre ;
3. Identifier les principales applications de l'hydrogène et les tendances mondiales ;
4. Distinguer l'hydrogène vert, l'hydrogène bleu et l'hydrogène gris ;
5. Décrire le principe de fonctionnement d'une pile à combustible ;
6. Mettre en relation les solutions fondées sur l'hydrogène et les défis énergétiques de l'Afrique de l'Ouest ;
7. Identifier des possibilités locales simples d'utilisation de l'hydrogène.

Glossaire des termes clés

8. **Hydrogène (H_2)** : gaz léger utilisé pour stocker et restituer de l'énergie.
9. **Électrolyse** : procédé consistant à décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'électricité.
10. **Pile à combustible** : dispositif qui convertit l'hydrogène en électricité et en eau.
11. **Hydrogène vert** : hydrogène produit à l'aide d'une énergie renouvelable (solaire ou éolienne).
12. **Hydrogène bleu** : hydrogène produit à partir de gaz avec captage du carbone.
13. **Hydrogène gris** : hydrogène produit à partir de combustibles fossiles sans captage du carbone.
14. **Électrolyseur** : équipement utilisé pour réaliser l'électrolyse.
15. **Matière première (feedstock)** : matière brute utilisée pour produire de l'hydrogène.
16. **Vecteur énergétique** : substance qui stocke et transporte de l'énergie.
17. **Décarbonation** : réduction des émissions de carbone des systèmes énergétiques.

CHAPITRE 1

DÉFIS ÉNERGÉTIQUES DE L'AFRIQUE ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE (H2-B1-1)

1.1. La réalité : les difficultés énergétiques quotidiennes en Afrique de l'Ouest

Dans toute l'Afrique de l'Ouest, les difficultés énergétiques font partie de la vie quotidienne. Prenons l'exemple d'un atelier de soudage à Lagos ou d'un entrepôt frigorifique à Accra. Les coupures de courant fréquentes interrompent les activités pendant des heures, voire des jours. Pour continuer à travailler, les entreprises utilisent des groupes électrogènes diesel, couramment appelés « gen » ou « I pass my neighbour ». Ces groupes sont coûteux à exploiter, bruyants et produisent des émissions nocives.

Dans les zones rurales du Sénégal, du nord du Nigeria et d'autres régions, de nombreux ménages dépendent encore des lampes à pétrole, du charbon de bois ou du bois de feu pour l'éclairage et la cuisson. Ces sources d'énergie sont non seulement inefficaces, mais présentent également des risques pour la santé et l'environnement. L'accès à l'électricité varie dans la région. Les figures 1.1 (a) et (b) présentent respectivement la carte de l'accès à l'électricité et le pourcentage de la population ayant accès à l'électricité en Afrique de l'Ouest. Le Ghana a atteint un taux d'accès relativement élevé, supérieur à 80 %, tandis que le Nigeria se situe en moyenne autour de 70 à 74 %, avec des niveaux nettement plus faibles dans les communautés rurales. Même lorsque l'électricité est disponible, l'approvisionnement est souvent peu fiable.

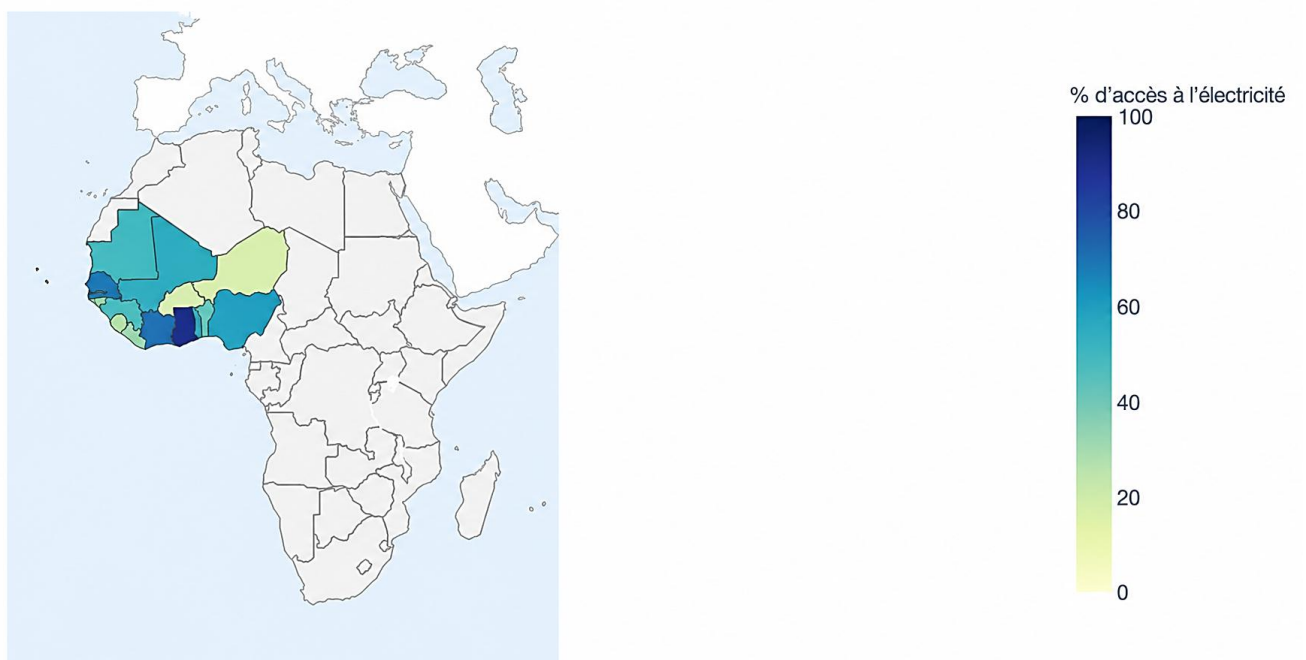


Figure 1.1 (a). Carte de l'accès à l'énergie en Afrique de l'Ouest

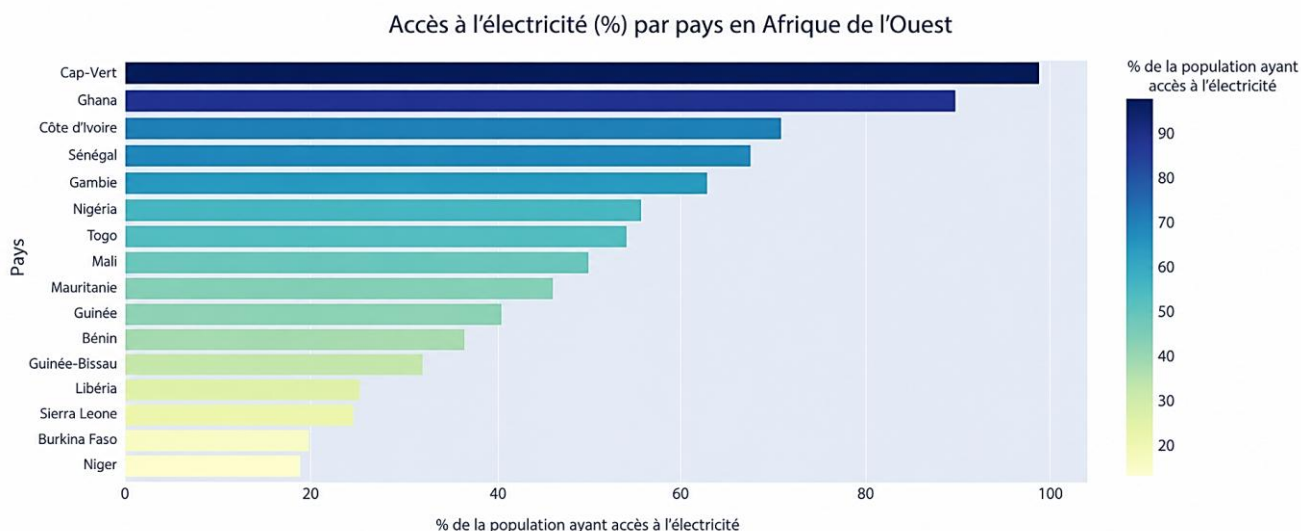


Figure 1.1 (b). Pourcentage d'accès à l'électricité par pays

Ces difficultés énergétiques ont de graves conséquences :

- 18. Les entreprises supportent des coûts d'exploitation élevés et une baisse de productivité ;
- 19. Les hôpitaux peinent à alimenter les équipements essentiels ;
- 20. Les élèves et étudiants ne disposent pas d'un éclairage fiable pour étudier ;
- 21. Les agriculteurs ne peuvent pas faire fonctionner de manière fiable leurs systèmes d'irrigation ou de stockage.

La forte dépendance à l'égard des combustibles fossiles importés, en particulier le gazole, pèse également sur les économies nationales et expose les pays aux fluctuations des prix mondiaux.

Réfléchissez : *comment le manque de fiabilité de l'électricité affecte-t-il les entreprises ou les services de votre communauté ? Quelles activités sont les plus perturbées ?*

1.2. Pourquoi les systèmes énergétiques sont-ils insuffisants ?

Les problèmes énergétiques de l'Afrique de l'Ouest sont complexes et interdépendants. Les principaux défis sont les suivants :

a) Limites des infrastructures : de nombreux systèmes électriques reposent sur des équipements vieillissants, des réseaux de transport fragiles et une maintenance insuffisante. Il en résulte des coupures fréquentes et un approvisionnement instable.

b) Obstacles à l'investissement et aux politiques publiques : les infrastructures énergétiques nécessitent d'importants investissements financiers. Toutefois, l'incohérence des politiques et l'incertitude réglementaire découragent souvent les investisseurs.

c) Pénurie de compétences : il existe un manque de techniciens formés aux systèmes énergétiques modernes, notamment aux énergies renouvelables, aux systèmes hybrides et aux technologies émergentes de l'hydrogène.

d) Dépendance aux combustibles fossiles : de nombreux pays utilisent du gazole et du gaz naturel pour produire de l'électricité. D'autres dépendent fortement de combustibles importés, ce qui les rend vulnérables aux chocs de prix.

e) Pressions climatiques et environnementales : la région est exposée à des risques climatiques croissants, notamment :

- 22. Les inondations dans les villes côtières telles que Lagos et Dakar ;
- 23. La sécheresse dans les régions du Sahel ;
- 24. La variabilité qui affecte l'hydroélectricité et l'agriculture.

Ces difficultés endommagent les infrastructures et réduisent la fiabilité de l'approvisionnement énergétique.

Le rôle des techniciens qualifiés : dans les secteurs industriels du Ghana, du Nigeria et de la Côte d'Ivoire, la demande augmente pour des techniciens capables de :

25. Assurer la maintenance des systèmes solaires et hybrides ;
26. Diagnostiquer l'instabilité du réseau ;
27. Prendre en charge des technologies émergentes telles que le stockage de l'hydrogène et les piles à combustible.

Le développement de ces compétences est essentiel à la création d'emplois comme à l'amélioration des systèmes énergétiques.

1.3. La nécessité d'une transition énergétique

Le système énergétique actuel n'est plus durable. La poursuite de la dépendance aux combustibles fossiles entraîne :

28. Des coûts énergétiques élevés ;
29. Une pollution de l'environnement ;
30. Une augmentation des émissions de gaz à effet de serre ;
31. Une vulnérabilité aux marchés mondiaux des combustibles.

Une transition énergétique est nécessaire afin de passer des systèmes fondés sur les combustibles fossiles à des sources d'énergie plus propres et plus durables. Pour l'Afrique de l'Ouest, cette transition est essentielle pour :

- a. **Sécurité énergétique :** utiliser les ressources énergétiques locales au lieu de produits importés ;
- b. **Croissance économique :** soutenir les secteurs industriels grâce à une alimentation électrique fiable ;
- c. **Protection de l'environnement :** réduire les émissions et la pollution ;
- d. **Résilience climatique :** construire des systèmes capables de résister aux phénomènes météorologiques extrêmes.

Trajectoire de transition énergétique :

Combustibles fossiles → Énergies renouvelables → Intégration de l'hydrogène

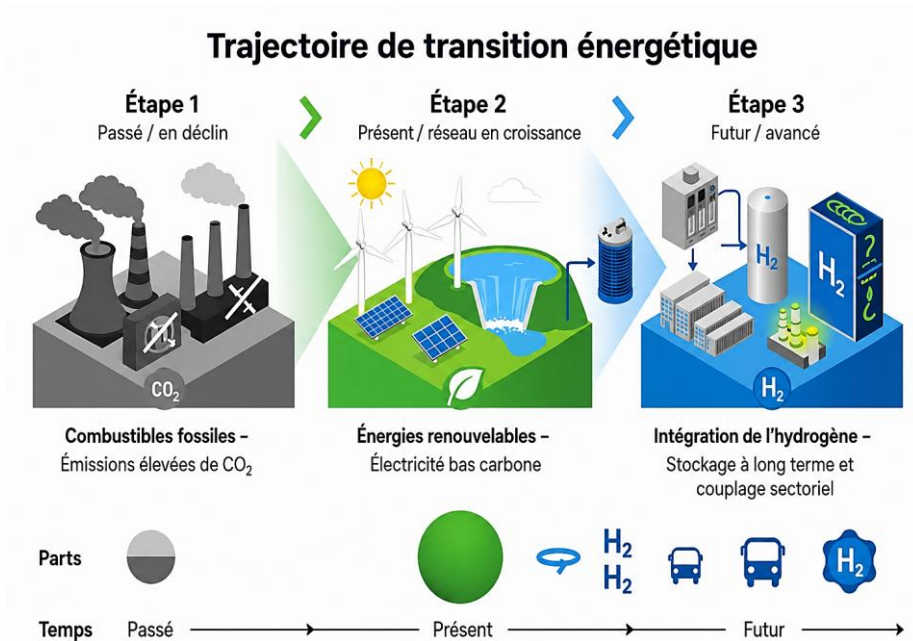


Figure 1.2. Trajectoire de transition énergétique

1.3.1. Potentiel des énergies renouvelables

L'Afrique de l'Ouest dispose d'importantes ressources en énergies renouvelables :

32. Énergie solaire (ensoleillement abondant toute l'année) ;
33. Énergie éolienne (en particulier dans les zones côtières) ;
34. Hydroélectricité (barrages existants, notamment Akosombo et Kainji) ;
35. Biomasse (résidus agricoles tels que les balles de riz et les pelures de manioc).

Toutefois, les sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien sont intermittentes : elles ne produisent pas de l'énergie en continu. Cela pose une difficulté majeure : comment stocker l'énergie afin de l'utiliser au moment où elle est nécessaire ?

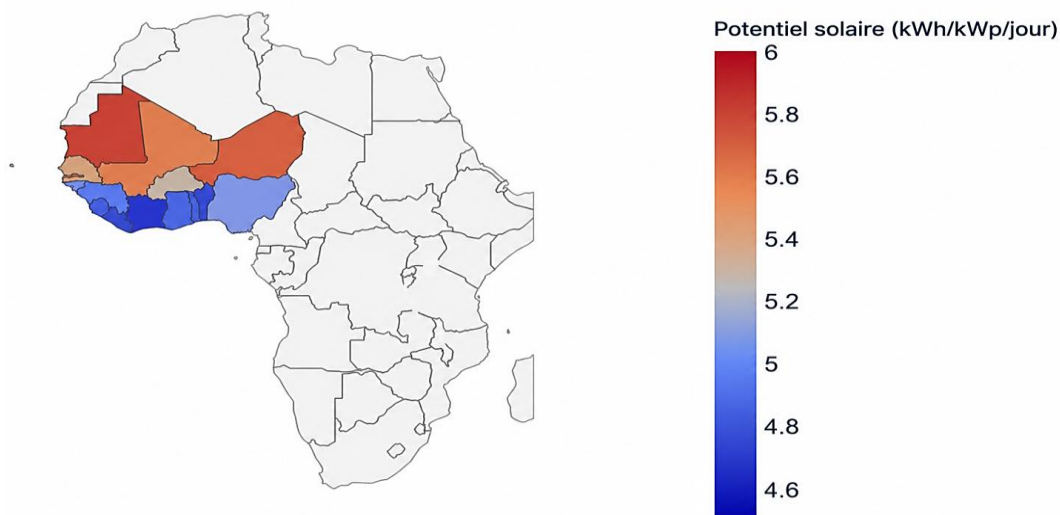


Figure 1.3. Potentiel solaire de l'Afrique de l'Ouest

1.4. Solutions énergétiques fondées sur l'hydrogène : une opportunité stratégique

L'énergie hydrogène offre une solution puissante à nombre des défis énergétiques de l'Afrique de l'Ouest. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire ; c'est un vecteur énergétique. Il peut donc stocker de l'énergie et la restituer lorsqu'elle est nécessaire. À l'aide d'électricité renouvelable, par exemple solaire, l'eau peut être décomposée en hydrogène et en oxygène par un procédé appelé électrolyse. L'hydrogène ainsi produit, appelé hydrogène vert, peut ensuite être stocké et utilisé ultérieurement.

1.4.1. Comment l'hydrogène répond-il aux principaux défis ?

Stockage de l'énergie : l'hydrogène stocke l'excédent d'énergie solaire produit pendant la journée et fournit de l'électricité la nuit ou durant les périodes de faible production.

Réduction de la dépendance au gazole : l'hydrogène peut remplacer le gazole dans les groupes électrogènes et les systèmes de secours, ce qui réduit les coûts de combustible et les émissions.

Soutien à l'industrie : l'hydrogène peut être utilisé dans la production d'engrais, le raffinage et les industries lourdes difficiles à électrifier.

Transport propre : les piles à combustible à hydrogène peuvent alimenter des autobus, des camions et d'autres véhicules lourds sans émissions à l'échappement.

Valorisation énergétique des déchets : les déchets agricoles, par exemple les pelures de manioc et les balles de riz, peuvent être convertis en biohydrogène, ce qui réduit le brûlage à l'air libre et la pollution.

1.4.2. Pourquoi l'hydrogène convient-il à l'Afrique de l'Ouest ?

- 36. L'abondance de l'énergie solaire favorise la production d'hydrogène vert ;
- 37. L'importance du secteur agricole fournit des ressources en biomasse ;
- 38. La croissance de la demande énergétique constitue un cas d'usage solide ;
- 39. Le secteur offre la possibilité de développer des industries et des compétences techniques locales.

Le secteur de l'hydrogène crée de nouvelles perspectives professionnelles, notamment dans les domaines suivants :

- 40. Exploitation et maintenance des électrolyseurs ;
- 41. Stockage de l'hydrogène et gestion de la sécurité ;
- 42. Installation et entretien des piles à combustible ;
- 43. Systèmes de transport et de distribution.

Réfléchissez : *dans quel domaine l'hydrogène pourrait-il avoir le plus grand impact dans votre communauté : alimentation électrique, transport ou industrie ?*

Ce chapitre met en évidence un message essentiel : les défis énergétiques de l'Afrique de l'Ouest sont importants, mais ils créent également des possibilités d'innovation et de transformation. L'énergie hydrogène constitue un élément déterminant de cette transition. Elle complète les énergies renouvelables, améliore la fiabilité de l'approvisionnement et soutient le développement durable. Les chapitres suivants présentent les propriétés et les catégories d'hydrogène (vert, bleu et gris), les méthodes de production, les tendances du marché mondial de l'hydrogène ainsi que les applications pratiques dans l'électricité, les transports et l'industrie.

Résumé du chapitre

L'Afrique de l'Ouest est confrontée à d'importants défis énergétiques, notamment le manque de fiabilité de l'approvisionnement électrique, la dépendance au gazole et la vulnérabilité climatique. Ces problèmes limitent la croissance économique et la qualité de vie. La transition vers une énergie propre est indispensable. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes, mais leur intermittence exige des solutions de stockage efficaces. L'énergie hydrogène offre une solution flexible et durable : elle permet de stocker l'énergie renouvelable, de réduire la dépendance aux combustibles fossiles, de soutenir les applications industrielles et de transport et de convertir les déchets locaux en combustible propre.

Questions de révision

- 44. Quels sont deux effets courants du manque de fiabilité de l'électricité dans les communautés d'Afrique de l'Ouest ?
- 45. Pourquoi la dépendance aux groupes électrogènes diesel n'est-elle pas durable ?
- 46. Quels sont les principaux moteurs de la transition énergétique en Afrique de l'Ouest ?
- 47. Comment l'hydrogène contribue-t-il à résoudre le problème de l'intermittence des énergies renouvelables ?
- 48. Donnez un exemple d'application possible de l'hydrogène dans votre région et expliquez ses avantages.

Chapitre 2

Propriétés, classifications et applications de l'hydrogène (H2-B1-2)

2.1. L'hydrogène en tant que vecteur énergétique

L'hydrogène est considéré comme l'un des vecteurs énergétiques propres les plus prometteurs pour les futurs systèmes énergétiques propres et durables. Toutefois, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire comme le charbon, le pétrole ou le rayonnement solaire. Il doit être produit à partir d'autres ressources, telles que l'eau, le gaz naturel ou la biomasse, au moyen de différentes technologies.

Un vecteur énergétique stocke l'énergie et la transporte de son lieu de production à son lieu d'utilisation. Par exemple :

- 49. L'électricité transporte l'énergie par les lignes électriques ;
- 50. Les batteries stockent l'énergie électrique ;
- 51. L'hydrogène stocke l'énergie sous forme chimique.

Aujourd'hui, le monde dépend principalement de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Ces combustibles sont disponibles en quantités limitées et provoquent également des problèmes environnementaux, notamment la pollution atmosphérique et le changement climatique. Face à ces difficultés, les scientifiques et les ingénieurs étudient des solutions énergétiques plus propres. L'hydrogène constitue l'une des options importantes envisagées. Il peut jouer un rôle essentiel dans les systèmes énergétiques propres, en particulier lorsqu'il est produit à partir de sources d'énergie renouvelables telles que le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité. Lorsque l'hydrogène est utilisé dans une pile à combustible ou brûlé comme combustible, le principal sous-produit est l'eau. L'hydrogène est ainsi présenté comme propre et respectueux de l'environnement, puisqu'aucun dioxyde de carbone n'est émis.

2.2. Propriétés de l'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus léger et le plus abondant de l'Univers. Il possède plusieurs propriétés physiques et chimiques particulières qui le rendent utile en tant que vecteur énergétique. Son symbole chimique est H ; sous sa forme moléculaire, il s'écrit H₂. Son numéro atomique est 1. L'hydrogène est environ 14 fois plus léger que l'air ; il se diffuse donc rapidement dans l'atmosphère. En raison de sa faible masse volumique, son stockage exige des volumes importants, sauf s'il est comprimé ou liquéfié. Ses propriétés physiques et chimiques détaillées sont présentées dans les sections suivantes.

2.2.1. Propriétés physiques

Tableau 2.1. Propriétés physiques de H₂

Propriété	Valeur	Description
Symbole chimique	H ₂	Molécule diatomique
Masse molaire	2,016 g/mol	Molécule la plus légère
Masse volumique (gaz aux CNTP)	0,0899 kg/m ³	Très faible masse volumique
Point d'ébullition	-252,9 °C	Température d'ébullition très basse
Point de fusion	-259,2 °C	Température extrêmement basse à l'état solide
Couleur	Incolore	Gaz invisible

Propriété	Valeur	Description
Odeur	Inodore	Non détectable par l'odorat

2.2.2. Propriétés chimiques

Deux atomes d'hydrogène se combinent pour former une molécule d'hydrogène.



Les principales caractéristiques chimiques sont les suivantes :

- 52. Très inflammable, avec un domaine d'inflammabilité dans l'air compris entre 4 et 75 % ;
- 53. Rendement de combustion élevé ;
- 54. Énergie d'allumage élevée par rapport aux vapeurs d'essence ;
- 55. Production d'eau lors de la combustion.

La réaction de combustion de l'hydrogène, qui libère une énergie propre sans émissions de carbone, s'écrit comme suit :



Illustration : l'hydrogène est comparable à une batterie sous forme gazeuse. Il stocke de l'énergie qui a été produite ailleurs.

2.2.3. Densité énergétique de l'hydrogène

La densité énergétique décrit la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou par unité de volume d'un combustible.

Deux types de densité énergétique sont importants :

a. Densité énergétique massique

Énergie par unité de masse (MJ/kg). L'hydrogène possède une densité énergétique massique très élevée par rapport à la plupart des combustibles. Comme l'indique le tableau 2.2, 1 kg d'hydrogène contient près de trois fois plus d'énergie que 1 kg d'essence.

Tableau 2.2. Comparaison de la teneur énergétique de différentes substances

Combustible	Densité énergétique (MJ/kg)
Essence	44
Gazole	45
Méthane	55
Hydrogène	120

b. Densité énergétique volumique

La densité énergétique volumique correspond à l'énergie par unité de volume (MJ/L). L'hydrogène possède une très faible densité énergétique volumique, car il s'agit d'un gaz léger. Les densités énergétiques caractéristiques de l'hydrogène sous ses formes gazeuse, liquide et solide sont indiquées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Densités énergétiques de l'hydrogène sous ses différentes formes

Combustible	Densité énergétique (MJ/L)
Hydrogène (gaz)	≈ 0,01

Combustible	Densité énergétique (MJ/L)
Hydrogène liquide	≈ 8,5
Essence	≈ 32
Gazole	≈ 36

En raison de cette limitation, l'hydrogène doit souvent être :

- 56. Comprimé (350-700 bar) ;
- 57. Liquéfié (-253 °C) ;
- 58. Stocké dans des hydrures métalliques ou dans des vecteurs chimiques.

2.3. Classification de l'hydrogène

Des « couleurs » particulières sont utilisées pour indiquer dans quelle mesure l'hydrogène est propre ou polluant. La couleur ne désigne pas la couleur réelle du gaz. Elle indique plutôt la quantité de pollution, notamment de dioxyde de carbone, produite lors de la fabrication de l'hydrogène. Il est très important que les techniciens et les étudiants d'Afrique de l'Ouest comprennent ces catégories. Elles permettent de choisir la méthode de production de l'hydrogène la plus adaptée et la plus propre en fonction des ressources locales. Le tableau 2.4 résume la classification de l'hydrogène par couleur, les méthodes de production et leurs incidences environnementales.

a) Hydrogène gris : l'hydrogène gris est aujourd'hui le type d'hydrogène le plus couramment utilisé dans le monde. Il est produit à partir de gaz naturel par vaporeformage du méthane (Steam Methane Reforming, SMR). Le dioxyde de carbone généré au cours du procédé est rejeté dans l'atmosphère. Il est présenté dans la source comme l'hydrogène actuellement le moins cher. Il contribue toutefois à la pollution atmosphérique en raison des rejets de dioxyde de carbone. De nombreuses industries nigérianes utilisent actuellement de l'hydrogène gris, car le pays dispose de gaz naturel.

b) Hydrogène bleu : l'hydrogène bleu est également produit à partir de gaz naturel par SMR, mais le dioxyde de carbone est capté et stocké dans le sous-sol au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère. Il est plus propre que l'hydrogène gris, mais le captage du dioxyde de carbone rend le procédé plus coûteux.

c) Hydrogène vert : l'hydrogène vert est présenté comme le type le plus propre. Il est produit par électrolyse au moyen d'électricité provenant de panneaux solaires ou d'éoliennes. Aucun combustible fossile n'est utilisé. Sa production génère une pollution presque nulle et son utilisation ne rejette que de l'eau. La source le présente comme la meilleure option pour l'avenir. Il reste toutefois plus cher que l'hydrogène gris, même si son coût diminue rapidement.

d) Hydrogène brun : l'hydrogène brun est produit à partir de charbon à très haute température. Il peut être peu coûteux dans les pays disposant de grandes quantités de charbon. Il génère toutefois une pollution importante et de grandes quantités de dioxyde de carbone ; il est présenté comme le type d'hydrogène le plus polluant et le plus nocif pour l'environnement.

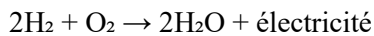
Tableau 2.4. Synthèse de la classification de l'hydrogène par couleur

Type d'hydrogène	Méthode de production	Incidence environnementale
Hydrogène gris	Gaz naturel	Émissions élevées de CO ₂
Hydrogène bleu	Gaz naturel + captage du carbone	Émissions plus faibles
Hydrogène vert	Électrolyse de l'eau avec une énergie renouvelable	Très propre

2.4. Principe de base d'une pile à combustible

Une pile à combustible convertit l'hydrogène en électricité. Elle fonctionne comme une batterie, mais ne s'épuise pas tant qu'elle est alimentée en combustible. L'hydrogène entre dans la pile à combustible par un côté. L'oxygène provenant de l'air entre par l'autre côté. Une réaction chimique se produit à l'intérieur de la pile. L'hydrogène se sépare en protons et en électrons. Les électrons circulent dans un circuit et produisent de l'électricité. Les protons se combinent avec l'oxygène pour former de l'eau. Ce procédé produit de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Il ne génère aucune émission nocive directe.

Réaction dans la pile à combustible : hydrogène + oxygène → électricité + eau



Un schéma fonctionnel simple illustrant la production d'hydrogène à l'aide de l'énergie solaire est présenté à la figure 2.1 ci-dessous.

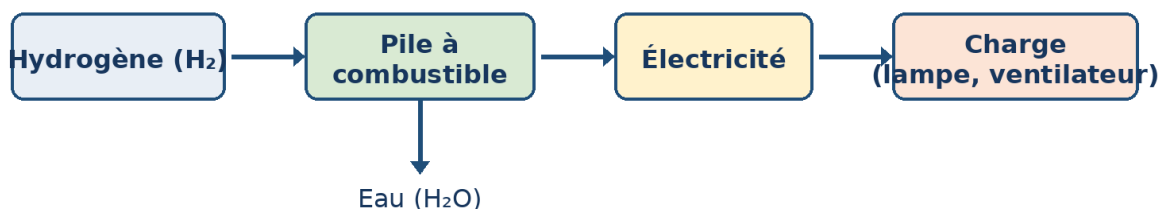


Figure 2.1. Schéma conceptuel de conversion de l'énergie solaire en H₂

2.5. Intégration de l'hydrogène aux énergies renouvelables

L'hydrogène permet de valoriser des sources d'énergie renouvelables propres telles que le soleil et le vent. Lorsque des panneaux solaires ou des éoliennes produisent de l'électricité, en particulier lorsque de l'électricité excédentaire est disponible, celle-ci peut alimenter un procédé appelé électrolyse. Lors de l'électrolyse, l'électricité sert à décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. L'hydrogène produit peut ensuite être stocké en vue d'une utilisation ultérieure. On obtient ainsi des systèmes de conversion du solaire en hydrogène ou de l'éolien en hydrogène. Ces systèmes permettent de stocker l'énergie renouvelable sur une longue durée et contribuent à fiabiliser l'énergie propre lorsque le soleil ne brille pas ou que le vent ne souffle pas.

Le schéma de la figure 2.2 représente des éoliennes et des panneaux solaires qui fournissent de l'électricité, par l'intermédiaire de convertisseurs, à un électrolyseur. Celui-ci décompose l'eau en hydrogène, qui est stocké, et en oxygène. Des flèches indiquent le flux d'énergie depuis les sources renouvelables jusqu'à la production et au stockage de l'hydrogène. L'hydrogène peut ainsi être produit à partir d'électricité renouvelable par électrolyse de l'eau, ce qui permet :

- 59. Des systèmes de conversion du solaire en hydrogène ;
- 60. Des systèmes de conversion de l'éolien en hydrogène ;
- 61. Le stockage de longue durée des énergies renouvelables.

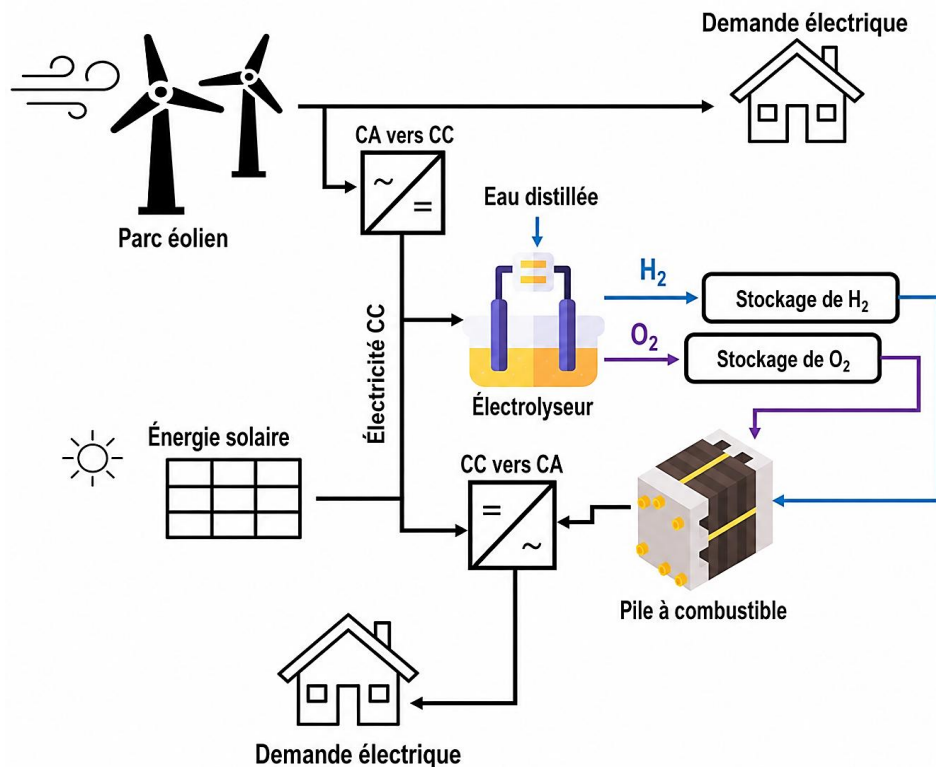


Figure 2.2. Intégration de H₂ aux énergies renouvelables

2.6. Capacité de stockage de l'énergie

L'hydrogène peut stocker l'excédent d'énergie renouvelable, puis être reconverti en électricité au moyen de piles à combustible et de turbines à gaz. Il contribue ainsi à la stabilité du réseau et au stockage saisonnier de l'énergie. L'hydrogène fonctionne comme une batterie pour les énergies renouvelables, mais il peut conserver de grandes quantités d'énergie pendant une longue durée, y compris plusieurs mois ou saisons. Lorsqu'un excédent d'énergie solaire ou éolienne est disponible, par exemple durant les journées ensoleillées dans les régions d'Afrique à fort potentiel solaire, il alimente l'électrolyse qui produit de l'hydrogène à partir d'eau. L'hydrogène est stocké en toute sécurité dans des réservoirs. Plus tard, lorsque de l'énergie est nécessaire, par exemple la nuit ou durant les périodes peu venteuses, l'hydrogène peut être reconverti en électricité au moyen de piles à combustible, qui associent l'hydrogène et l'oxygène pour produire proprement de l'électricité, ou de turbines à gaz. Cela contribue à stabiliser le réseau électrique et à fournir de l'énergie lorsque les sources renouvelables ne produisent pas suffisamment.

Illustration : de nombreux pays africains disposent d'un fort potentiel solaire. Cette énergie peut être stockée sous forme d'hydrogène en vue d'une utilisation ultérieure.

Exemple : énergie solaire → électrolyse → hydrogène → électricité la nuit.

Ce procédé permet de stocker l'énergie renouvelable pour l'électrification rurale.

Le schéma de la figure 2.4 montre le soleil éclairant des panneaux solaires pendant la journée. Ceux-ci alimentent un électrolyseur qui utilise de l'eau pour produire de l'hydrogène, stocké dans un réservoir. L'hydrogène fournit ensuite à nouveau de l'électricité durant la nuit, par exemple pour alimenter une habitation ou une ampoule.

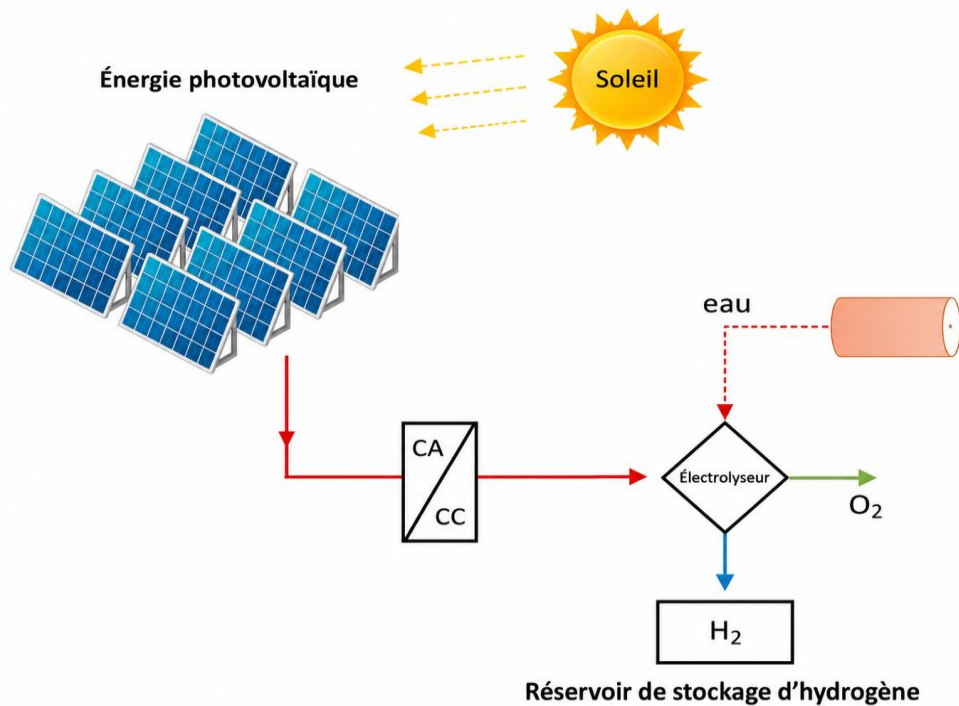


Figure 2.4. Système de stockage de l'énergie solaire sous forme d'hydrogène

2.7. Avantages et limites de l'hydrogène

L'hydrogène présente plusieurs avantages, mais également des difficultés technologiques.

2.7.1. Avantages de l'hydrogène

a. Source d'énergie propre : lorsqu'il est utilisé dans une pile à combustible ou pour la combustion :



Le seul sous-produit est la vapeur d'eau, ce qui rend l'hydrogène respectueux de l'environnement.

b. Teneur énergétique élevée : l'hydrogène présente la plus forte énergie par unité de masse de tous les combustibles. Il convient donc aux véhicules à pile à combustible, aux applications aérospatiales et aux systèmes de stockage d'énergie.

À l'avenir, à mesure que le monde s'éloignera progressivement des combustibles fossiles, l'hydrogène et l'électricité devraient devenir les deux principaux vecteurs utilisés pour fournir de l'énergie aux transports, aux industries, aux habitations et à d'autres services. Cette évolution correspond au passage d'un système énergétique fondé sur les combustibles fossiles à un nouveau système souvent appelé économie de l'hydrogène.

2.7.2. Limites de l'hydrogène

a) Difficultés de stockage : en raison de sa faible masse volumique, le stockage de l'hydrogène exige des réservoirs à haute pression, des systèmes cryogéniques et des matériaux avancés.

b) Limites des infrastructures : l'hydrogène nécessite de nouvelles infrastructures telles que des conduites, des stations de ravitaillement et des systèmes de stockage. À l'heure actuelle, les infrastructures dédiées à l'hydrogène restent limitées dans de nombreux pays.

c) Coût de production : la production d'hydrogène vert par électrolyse demeure plus coûteuse que les combustibles fossiles, même si les coûts diminuent rapidement.

d) Problèmes de sécurité : l'hydrogène est très inflammable et difficile à détecter, car il est incolore et inodore. Toutefois, les technologies modernes de sécurité ont permis de fiabiliser les systèmes à hydrogène.

Les apprenants et les techniciens doivent donc comprendre les propriétés de l'hydrogène afin d'assurer la sécurité du stockage et du transport, la détection des fuites et la maintenance des systèmes.

Réfléchissez : *pourquoi l'hydrogène est-il considéré comme un vecteur énergétique plutôt que comme une source d'énergie ?*

2.8. Applications du vecteur énergétique hydrogène

Transport

- 62. Véhicules électriques à pile à combustible ;
- 63. Autobus à hydrogène ;
- 64. Trains à hydrogène.

Production d'électricité

- 65. Centrales électriques à piles à combustible ;
- 66. Turbines à hydrogène.

Industrie

- 67. Production d'acier ;
- 68. Fabrication d'ammoniac ;
- 69. Raffinage du pétrole.

Stockage de l'énergie

- 70. Stockage des énergies renouvelables ;
- 71. Systèmes de conversion d'électricité en gaz (power-to-gas).

2.9. Résumé du chapitre

L'hydrogène est un important vecteur énergétique propre qui présente un potentiel considérable dans les futurs systèmes énergétiques. Il possède des propriétés particulières, notamment une densité énergétique massique élevée, une combustion propre et une compatibilité avec les systèmes d'énergie renouvelable. Toutefois, des défis liés au stockage, aux infrastructures et aux coûts doivent encore être relevés.

L'hydrogène est classé en différents types selon les méthodes employées pour le produire, notamment l'hydrogène vert, bleu et gris. Parmi ceux-ci, l'hydrogène vert constitue l'option la plus durable pour atteindre la neutralité carbone mondiale. Les propriétés de l'hydrogène en font un vecteur énergétique puissant. Les différentes méthodes de production déterminent leur incidence environnementale, l'hydrogène vert étant présenté comme l'option la plus durable.

Questions de révision

- 72. Qu'est-ce qui rend l'hydrogène intéressant en tant que vecteur énergétique ?
- 73. Qu'est-ce qui distingue l'hydrogène des autres combustibles ?
- 74. Distinguez l'hydrogène vert, l'hydrogène bleu et l'hydrogène gris.
- 75. Qu'est-ce que l'hydrogène vert ?
- 76. Pourquoi l'hydrogène vert est-il préféré à l'hydrogène gris ?
- 77. Citez deux applications de l'énergie hydrogène.
- 78. Quels secteurs peuvent bénéficier des technologies de l'hydrogène ?
- 79. Étude de cas : projets liés à l'hydrogène en Afrique ;
- 80. Discussion en groupe : hydrogène ou batteries pour le stockage de l'énergie.

Références

[1] H201

[2] current status

[3]

Chapitre 3

Économie mondiale de l'hydrogène et tendances du marché

3.1. Introduction

L'hydrogène prend une place croissante dans la transition mondiale vers une énergie propre et durable. Contrairement aux combustibles fossiles, il brûle sans produire d'émissions carbonées, ce qui en fait une option présentée comme plus propre pour alimenter les industries, les transports et les systèmes électriques. Il joue également un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie produite à partir de sources renouvelables telles que le solaire et l'éolien, qui sont abondantes, mais ne sont pas toujours disponibles. De nombreux pays investissent donc dans les technologies de l'hydrogène afin d'atteindre leurs objectifs climatiques et d'améliorer leur sécurité énergétique. Cet intérêt mondial croissant crée de nouvelles possibilités économiques, notamment le développement d'industries, d'infrastructures et de chaînes d'approvisionnement liées à l'hydrogène.

Pour des régions telles que l'Afrique de l'Ouest, cette tendance constitue une opportunité précieuse. Grâce à un fort potentiel en énergies renouvelables et à un besoin croissant d'énergie fiable et abordable, l'hydrogène peut soutenir le développement local tout en ouvrant des possibilités d'exportation. Surtout, l'expansion du secteur de l'hydrogène créera une demande de travailleurs qualifiés. Il est donc particulièrement important que les systèmes d'enseignement et de formation techniques et professionnels (EFTP ; TVET dans la source) préparent les étudiants aux emplois émergents de ce domaine.

3.2. Moteurs mondiaux de la croissance de l'hydrogène

Plusieurs forces puissantes stimulent l'intérêt croissant pour l'hydrogène. Les politiques de lutte contre le changement climatique incitent les pouvoirs publics à réduire la pollution qui affecte des secteurs tels que l'agriculture et la pêche, en particulier dans des régions comme l'Afrique de l'Ouest. Dans le même temps, de nombreux pays se sont engagés à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, ce qui accroît la demande de solutions énergétiques plus propres. Les industries, notamment les usines et les raffineries, cherchent également à décarboner leurs activités pour rester compétitives dans une économie bas-carbone. En outre, les préoccupations relatives à la sécurité énergétique incitent les pays à produire leurs propres combustibles propres afin de réduire leur dépendance à l'égard du pétrole importé et coûteux. Ces facteurs vous concernent, car ils créent une demande de techniciens qualifiés ici même, en Afrique de l'Ouest.

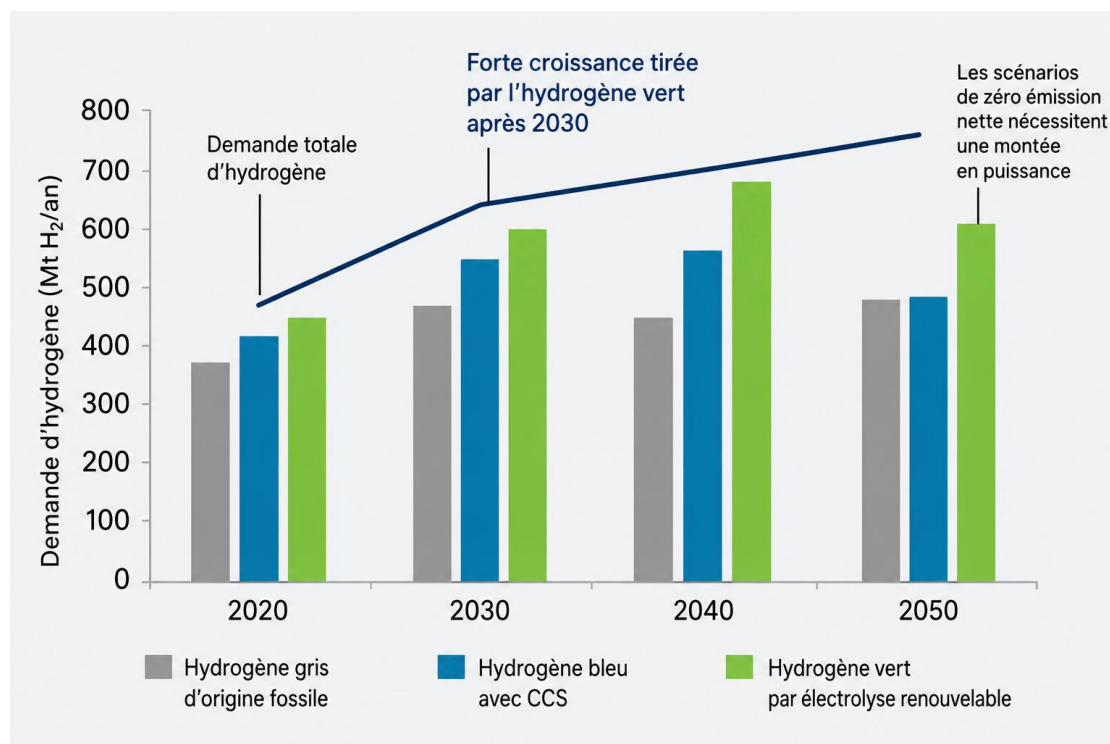


Figure 3.1. Prévision de la demande mondiale d'hydrogène

3.3. Principaux marchés de l'hydrogène

L'économie mondiale de l'hydrogène se développe dans plusieurs régions clés, qui présentent chacune des rôles et des perspectives différents. Comprendre ces marchés aide les pays africains et les stagiaires de l'EFTP à déterminer d'où pourront provenir les futurs emplois et partenariats.

L'Europe est actuellement en tête du développement de l'hydrogène vert. De nombreux pays européens investissent massivement dans les énergies propres afin d'atteindre des objectifs climatiques stricts. Toutefois, ils ne disposent pas d'une capacité renouvelable suffisante pour produire tout l'hydrogène dont ils ont besoin et prévoient donc d'en importer de grandes quantités depuis d'autres régions, notamment l'Afrique. Cette situation offre aux pays africains la possibilité de devenir exportateurs et aux travailleurs qualifiés celle de soutenir les activités de production et d'exportation. L'Asie, en particulier des pays tels que le Japon et la Corée du Sud, connaît également une forte demande d'hydrogène. Ces pays disposent de stratégies nationales claires et sont prêts à payer pour importer de l'hydrogène propre, car leurs ressources naturelles sont limitées. Ils investissent dans les technologies de l'hydrogène, notamment les piles à combustible, les systèmes de transport et la production d'électricité, ce qui crée une demande mondiale d'approvisionnement et d'expertise technique.

Le Moyen-Orient se concentre sur de grands projets d'hydrogène principalement destinés à l'exportation. Les pays de cette région utilisent leur énergie solaire abondante et peu coûteuse pour produire de l'hydrogène vert à des prix compétitifs. Ils développent des infrastructures et des systèmes d'exportation avancés, ce qui en fait à la fois de solides concurrents et de possibles partenaires pour le partage de connaissances. L'Afrique constitue un marché émergent très prometteur. Grâce à ses vastes ressources solaires et éoliennes, elle peut produire de l'hydrogène vert à faible coût. Parallèlement, la demande locale d'énergie plus propre augmente dans l'industrie, les transports et l'agriculture. L'Afrique peut donc jouer un double rôle : fournir les marchés mondiaux et utiliser l'hydrogène pour soutenir son propre développement.

Pour les apprenants de l'EFTP, ces marchés mondiaux soulignent l'importance d'acquérir des compétences pratiques dans les énergies renouvelables, l'exploitation des installations, la maintenance et la sécurité. À mesure que les projets liés à

l'hydrogène se développent dans ces régions, des techniciens qualifiés seront indispensables pour soutenir la production, le transport et les systèmes d'utilisation finale, en Afrique comme dans les projets internationaux.

3.4. Chaîne de valeur de l'hydrogène

La chaîne de valeur de l'hydrogène décrit l'ensemble du parcours de l'hydrogène, depuis sa production jusqu'à son utilisation finale, comme l'illustre la figure 3.1. En Afrique, cette chaîne de valeur est particulièrement importante, car le continent dispose de ressources solaires et éoliennes abondantes qui peuvent servir à produire de l'hydrogène propre, ou vert, et soutenir le développement local et l'emploi.

La première étape est la production, au cours de laquelle l'hydrogène est fabriqué. En Afrique, la méthode la plus prometteuse est la production d'hydrogène vert à partir d'énergies renouvelables : solaire dans des pays tels que l'Éthiopie, la Namibie et le Maroc, ou éolienne dans les régions côtières. Cela crée des possibilités pour les techniciens chargés d'installer, d'exploiter et d'entretenir les panneaux solaires, les éoliennes et les systèmes d'électrolyse. La deuxième étape est le stockage, qui consiste à conserver l'hydrogène en toute sécurité jusqu'à son utilisation. L'hydrogène doit être stocké dans des réservoirs spéciaux ou, parfois, dans des cavités souterraines. Cette opération exige des travailleurs qualifiés qui connaissent les normes de sécurité, les systèmes sous pression et les procédures d'inspection : autant de fonctions importantes pour les diplômés de l'EFTP formés à la mécanique et à la sécurité.

La troisième étape est le transport de l'hydrogène depuis les sites de production, souvent situés dans des zones rurales ou côtières, jusqu'aux villes, aux industries ou aux terminaux d'exportation. En Afrique, il peut s'effectuer par camions, conduites ou navires. Des techniciens en logistique et des opérateurs de transport sont nécessaires pour manipuler les équipements, surveiller la sécurité et gérer les chaînes d'approvisionnement. La dernière étape est l'utilisation finale de l'hydrogène dans des secteurs concrets. En Afrique, il peut s'agir d'utiliser l'hydrogène dans les usines, d'alimenter des autobus ou des camions en ville, de produire de l'électricité ou de fabriquer des engrais pour l'agriculture. La production locale d'engrais à partir d'hydrogène peut, par exemple, réduire la dépendance aux importations et soutenir les agriculteurs. Cette étape crée des emplois d'opérateurs d'installation, de techniciens de maintenance et de conducteurs de procédé.

Chaque partie de la chaîne de valeur de l'hydrogène exige des travailleurs formés et dotés de compétences pratiques. Un technicien en logistique doit, par exemple, vérifier que les réservoirs d'hydrogène sont correctement fermés et sûrs avant leur transport, tandis qu'un technicien électricien peut assurer la maintenance des systèmes d'énergie renouvelable utilisés pour la production. L'hydrogène représente ainsi non seulement une solution énergétique, mais aussi une importante possibilité de développement des compétences et de l'emploi dans toute l'Afrique.

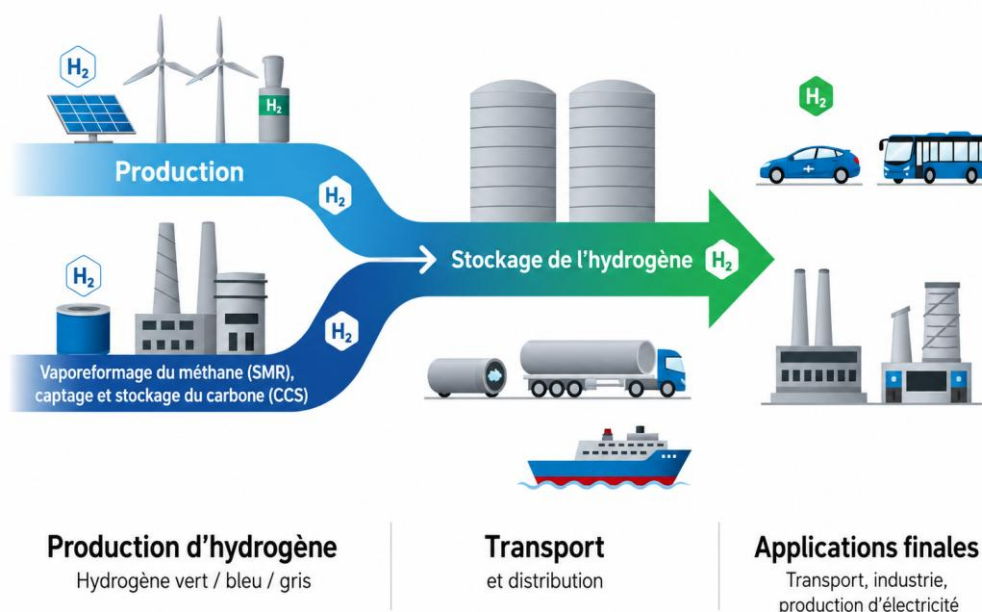


Figure 3.1. Chaîne de valeur de l'hydrogène en Afrique

3.5. Position de l'Afrique dans l'économie de l'hydrogène

L'Afrique est bien placée pour devenir un acteur important de l'économie mondiale de l'hydrogène. Cette situation tient principalement à l'abondance de ses ressources naturelles, notamment l'ensoleillement et le vent, indispensables à la production d'hydrogène vert. La figure 3.2 illustre les zones d'opportunité de l'hydrogène en Afrique. Des pays tels que la Namibie, le Maroc, le Kenya et l'Éthiopie peuvent produire de grandes quantités d'énergie renouvelable à un coût relativement faible. Ils ont ainsi la possibilité non seulement de répondre à leurs besoins énergétiques locaux, mais aussi d'exporter de l'hydrogène vert et des produits associés, tels que l'ammoniac, vers des régions comme l'Europe et l'Asie, où la demande d'énergie propre augmente.

Dans le même temps, l'hydrogène peut être utilisé localement pour répondre à certains des principaux défis de l'Afrique. Dans les zones rurales où l'accès à l'électricité est limité, l'hydrogène vert peut, par exemple, soutenir les mini-réseaux et les systèmes d'alimentation de secours. Dans des secteurs tels que la transformation des aliments, l'extraction minière et les transports, il offre une solution plus propre que le gazole et les autres combustibles fossiles. Il peut ainsi contribuer à réduire la pollution et, à terme, les coûts de combustible, tout en améliorant la productivité.

La coopération régionale commence également à se développer. En Afrique de l'Ouest, les pays de la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO ; ECOWAS dans la source) étudient des stratégies communes afin de développer des projets liés à l'hydrogène, de partager les connaissances et de renforcer les capacités techniques. Cette coopération peut aider les pays à tirer les enseignements de leurs expériences respectives, à réduire les coûts et à créer des marchés régionaux pour les technologies de l'hydrogène.

Pour les systèmes d'EFTP, cette évolution constitue une opportunité majeure. À mesure que les projets liés à l'hydrogène se développent, la demande augmentera pour des travailleurs qualifiés tels que les techniciens en énergies renouvelables, les opérateurs d'installation, les inspecteurs de sécurité, les soudeurs et les professionnels de la logistique. Les formateurs doivent donc préparer les étudiants en leur transmettant des compétences pratiques relatives aux systèmes d'énergie renouvelable, aux principes chimiques de base de l'hydrogène, aux procédures de sécurité et à la maintenance des équipements. La position de l'Afrique dans l'économie de l'hydrogène concerne donc non seulement l'énergie, mais aussi la création d'emplois, le développement des compétences et la croissance économique durable.

Éclairage professionnel :

De nouveaux métiers s'ouvrent aux diplômés de l'EFTP :

81. Opérateurs d'installations de production d'hydrogène ;
82. Techniciens en logistique ;
83. Inspecteurs de sécurité.

Ces emplois sont bien rémunérés et nécessitent des compétences pratiques que vous pouvez acquérir en atelier.

Exemples concrets

84. Dans une zone rurale du nord du Ghana, un petit projet pilote alimenté par l'énergie solaire produit de l'hydrogène vert qui fait fonctionner les groupes électrogènes d'un moulin à maïs local. Le moulin dispose ainsi d'une alimentation électrique stable, même la nuit, et deux nouveaux emplois de techniciens ont été créés pour des jeunes formés aux bases de l'électricité et de la sécurité.
85. Au Sénégal, des échanges soutenus par la CEDEAO ont donné naissance à de petits projets relatifs à l'hydrogène et liés à l'agriculture. Des agriculteurs proches de Dakar espèrent utiliser de l'hydrogène propre pour fabriquer des engrais localement au lieu d'importer des produits chimiques coûteux. Cette solution réduit les coûts pour les petites exploitations et crée des emplois d'inspecteurs de sécurité et d'opérateurs d'installation.
86. En Éthiopie, un important investissement international piloté par l'entreprise chinoise Ming Yang prévoit de consacrer plus de 10 milliards de dollars à des projets d'énergies renouvelables, d'hydrogène vert et de production d'ammoniac. Ces projets de grande ampleur visent à utiliser les importantes ressources renouvelables de l'Éthiopie afin de produire des combustibles propres destinés à l'utilisation locale et à l'exportation. Ils pourraient créer des emplois dans la construction, l'exploitation d'installations et l'ingénierie, tout en soutenant le développement industriel du pays.

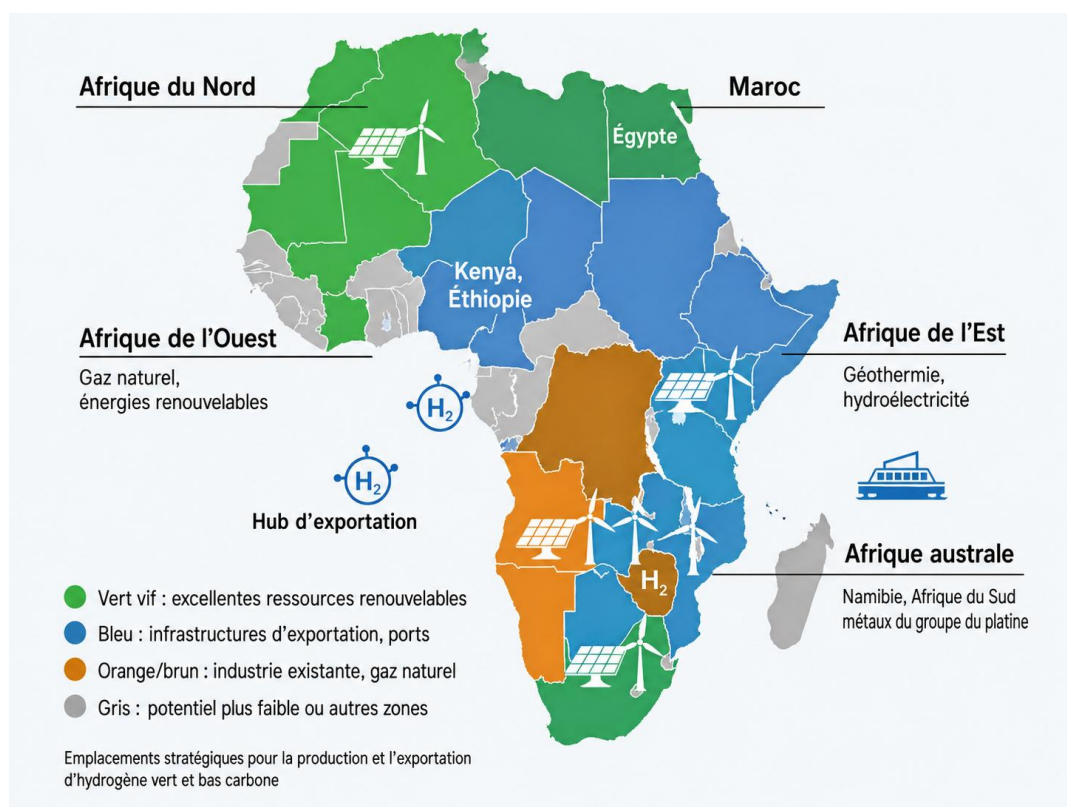


Figure 3.2. Zones d'opportunité de l'hydrogène en Afrique

3.6. Résumé du chapitre

L'hydrogène devient un élément essentiel de la transition énergétique mondiale, car il est présenté comme un combustible propre qui contribue à réduire la pollution. De nombreux pays investissent massivement dans l'hydrogène sous l'effet de facteurs importants tels que les politiques climatiques, les objectifs de neutralité carbone, la décarbonation de l'industrie et la recherche d'une meilleure sécurité énergétique. Les principaux marchés actuels de l'hydrogène sont l'Europe, qui est en tête pour l'hydrogène vert, l'Asie, notamment le Japon et la Corée du Sud, le Moyen-Orient, qui développe des projets tournés vers l'exportation, et l'Afrique, acteur émergent au potentiel considérable.

La chaîne de valeur de l'hydrogène comprend quatre étapes importantes : la production, en particulier d'hydrogène vert à partir d'énergie solaire ou éolienne, le stockage, le transport et l'utilisation finale dans l'industrie, les transports et la production d'électricité. L'Afrique dispose de solides atouts grâce à ses abondantes ressources solaires et éoliennes. Elle peut exporter de l'hydrogène vert vers d'autres régions tout en l'utilisant localement afin d'améliorer l'accès à l'électricité dans les villages, de soutenir l'agriculture et d'aider les petites industries. La CEDEAO soutient déjà la coopération régionale dans ce domaine.

De nouvelles possibilités d'emploi se présentent aux diplômés de l'EFTP, notamment comme opérateurs d'installations de production d'hydrogène, techniciens en logistique et inspecteurs de sécurité. Dans l'ensemble, l'économie mondiale de l'hydrogène connaît une croissance rapide, et l'Afrique de l'Ouest est bien placée pour en bénéficier si les étudiants acquièrent les compétences pratiques nécessaires à ces nouveaux métiers. Le chapitre invite à réfléchir au choix entre privilégier l'exportation de l'hydrogène et l'utiliser pour résoudre les problèmes énergétiques locaux.

Questions de révision

87. Citez deux moteurs mondiaux de la croissance de l'hydrogène.
88. Quelles sont les quatre étapes de la chaîne de valeur de l'hydrogène ? (Réponse courte.)
89. Vrai ou faux : l'Afrique ne peut qu'exporter de l'hydrogène et ne peut pas l'utiliser localement.
90. Quelle région est connue pour être en tête dans le domaine de l'hydrogène vert ? a) Europe ; b) Moyen-Orient ; c) Afrique.
91. Citez un nouveau métier qu'un diplômé de l'EFTP pourrait exercer dans le secteur de l'hydrogène.

Activité pour les étudiants

Discussion en groupe - 30 à 40 minutes

Travaillez par groupes de quatre à cinq. Appuyez-vous sur la question suivante : l'Afrique devrait-elle privilégier l'exportation de l'hydrogène ou son utilisation locale ?

92. Énumérez deux raisons en faveur de l'exportation et deux raisons en faveur de l'utilisation locale ;
93. Donnez un exemple tiré de votre ville ou de votre région : exploitation agricole, marché ou atelier ;
94. Dessinez sur papier une chaîne de valeur simple montrant le point de départ possible de l'hydrogène dans votre communauté, en prenant des panneaux solaires ou des éoliennes comme point de départ.

Matériel nécessaire : papier, stylo ou tableau. Présentez à la classe la meilleure idée de votre groupe.

Chapitre 4

Présentation générale des filières de production de l'hydrogène (H2-B1-4)

4.1. Introduction

L'hydrogène peut être produit par différentes méthodes selon les ressources naturelles disponibles, la technologie et le coût. Contrairement aux combustibles fossiles, qui sont directement extraits du sous-sol, l'hydrogène doit être produit à partir de substances telles que l'eau, le gaz naturel ou la biomasse. Ces méthodes sont appelées filières de production de l'hydrogène. Les régions du monde utilisent des méthodes différentes en fonction des ressources dont elles disposent.

Par exemple :

- 95. Les pays bénéficiant d'un fort ensoleillement peuvent utiliser l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène ;
- 96. Les pays disposant de ressources en gaz naturel recourent souvent à des procédés de reformage ;
- 97. Les régions agricoles peuvent utiliser des déchets de biomasse.

La compréhension de ces méthodes aide les techniciens et les apprenants à choisir la solution de production d'hydrogène la plus adaptée et la plus durable, en particulier dans les pays africains où les ressources renouvelables sont abondantes.

4.2. Principales méthodes de production

Plusieurs méthodes importantes permettent de produire de l'hydrogène. Chacune présente ses propres avantages, inconvénients et incidences environnementales.

4.2.1. Électrolyse (hydrogène vert)

L'électrolyse est le procédé qui consiste à décomposer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et en oxygène (O_2) au moyen d'électricité. Lorsque l'électricité provient d'une source renouvelable telle que le solaire ou l'éolien, l'hydrogène produit est appelé hydrogène vert. La production d'hydrogène vert à partir d'énergie solaire est illustrée à la figure 4.1. L'électrolyse constitue l'une des principales méthodes de production d'hydrogène pour les systèmes énergétiques propres. Elle utilise de l'eau (H_2O), de l'électricité, de préférence renouvelable, et un électrolyseur, comme le montre la figure 4.1. À l'intérieur de l'électrolyseur, le courant électrique décompose l'eau en hydrogène et en oxygène.

Un système d'électrolyse comprend les éléments suivants :

- 98. Une source d'alimentation électrique : panneaux solaires ou réseau ;
- 99. Un électrolyseur ;
- 100. Un système d'alimentation en eau ;
- 101. Des réservoirs de stockage des gaz.

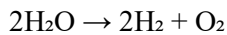
Illustration : l'électrolyse fonctionne comme la recharge d'une batterie ; au lieu de stocker l'électricité, elle stocke l'énergie dans l'hydrogène gazeux.

L'électrolyse convient particulièrement aux systèmes solaires en Afrique de l'Ouest pour les raisons suivantes :

- 102. L'ensoleillement est disponible toute l'année ;
- 103. Elle réduit la dépendance à l'égard des combustibles importés ;
- 104. Elle soutient des systèmes énergétiques propres et durables.

Dans le schéma du procédé d'électrolyse de la figure 4.1, l'eau entre dans l'électrolyseur, l'électricité la décompose en hydrogène et en oxygène, l'hydrogène gazeux est recueilli puis stocké dans des réservoirs, tandis que l'oxygène est rejeté ou utilisé à d'autres fins.

Réaction du procédé : eau + électricité → hydrogène + oxygène



Avantages :

- 105. Produit un hydrogène propre sans émissions de carbone ;
- 106. Utilise une énergie renouvelable ;
- 107. Convient aux zones rurales et hors réseau.

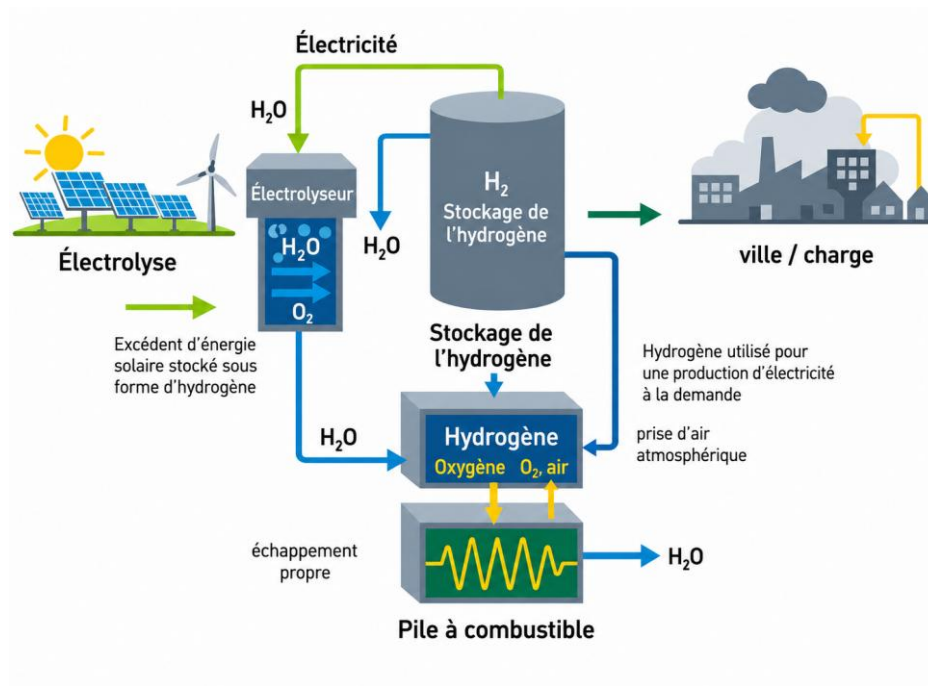


Figure 4.1. Production d'hydrogène vert à partir d'énergie solaire par électrolyse

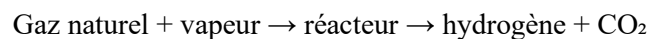
La figure 4.1 présente l'architecture d'un système solaire-hydrogène :

Panneaux solaires → électrolyseur → stockage de l'hydrogène → utilisation de l'énergie

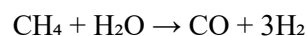
Ce système peut être adopté localement en Afrique de l'Ouest.

4.2.2. Vaporeformage du méthane (SMR)

Le vaporeformage du méthane est actuellement la méthode la plus répandue. Il utilise du gaz naturel, c'est-à-dire du méthane, et de la vapeur pour produire de l'hydrogène. La figure 4.2 illustre le déroulement du procédé SMR :



Réaction :



Avantages :

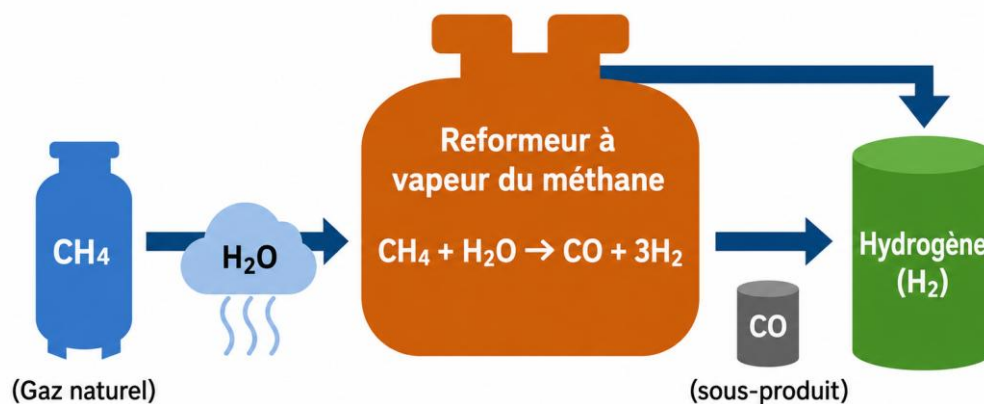
- 108. Technologie mature et largement utilisée ;
- 109. Coût inférieur à celui de l'électrolyse.

Inconvénients :

- 110. Produit du dioxyde de carbone (CO₂) ;

111. Contribue au changement climatique si les émissions ne sont pas captées.

Illustration : le SMR est comparable à la cuisson du gaz avec de la vapeur pour en extraire l'hydrogène, mais il libère de la « fumée », c'est-à-dire du CO₂.



Méthode de production d'hydrogène la plus utilisée aujourd'hui.

Figure 4.2. Production d'hydrogène par vaporeformage du méthane

4.2.3. Gazéification de la biomasse

La gazéification de la biomasse utilise des matières organiques, telles que les déchets agricoles, pour produire de l'hydrogène. Des matières comme les pelures de manioc, les balles de riz et les résidus de bois peuvent être utilisées. La figure 4.3 présente la filière biomasse-hydrogène :

Déchets agricoles → gazéifieur → production d'hydrogène

Réaction du procédé : biomasse + chaleur → mélange gazeux → hydrogène

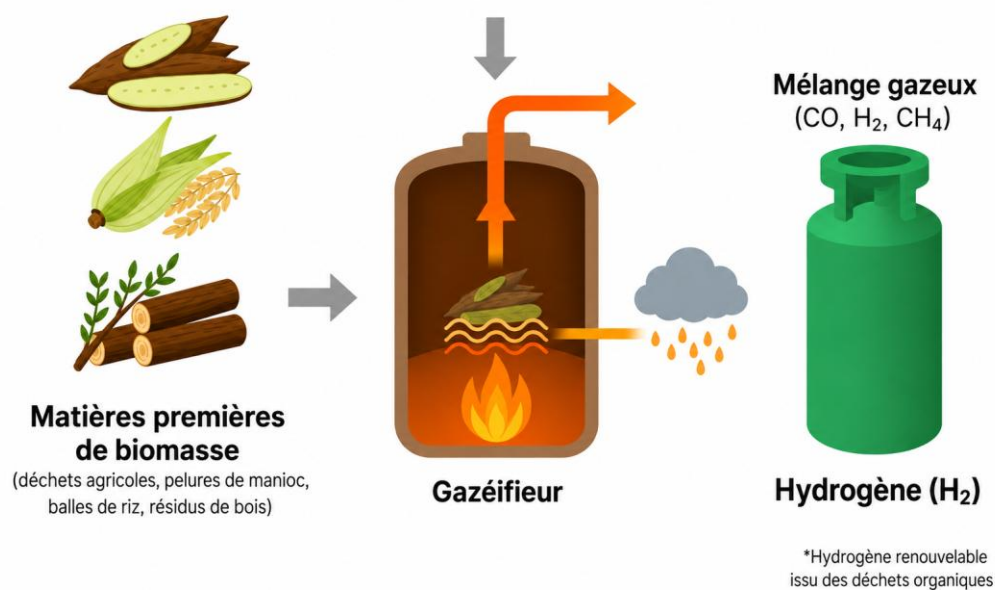


Figure 4.3. Production d'hydrogène par vaporeformage du méthane

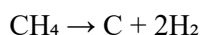
Avantages :

- 112. Utilise des déchets agricoles locaux ;
- 113. Réduit la pollution de l'environnement ;
- 114. Crée des possibilités d'emploi dans les zones rurales.

4.3.4. Pyrolyse du méthane

La pyrolyse du méthane décompose le méthane en hydrogène, appelé hydrogène turquoise dans la classification par couleur, et en carbone solide, plutôt qu'en dioxyde de carbone.

Réaction :



Avantages :

- 115. Produit de l'hydrogène sans émissions de CO₂ ;
- 116. Le carbone solide peut être utilisé dans l'industrie.

Inconvénients :

- 117. La technologie est encore en cours de développement ;
- 118. Elle nécessite des systèmes à haute température.

4.4. Possibilités de production locale

La production d'hydrogène peut être adaptée aux conditions locales de l'Afrique de l'Ouest et des régions subsahariennes.

4.4.1. Électrolyse alimentée par l'énergie solaire

De nombreux pays africains bénéficient d'un fort ensoleillement. Les panneaux solaires peuvent produire l'électricité nécessaire aux systèmes d'électrolyse, comme l'illustre la figure 4.1, selon la chaîne de conversion énergétique suivante :

Énergie solaire → électrolyse → hydrogène → électricité ou combustible

Avantages :

- 119. Production d'énergie propre ;
- 120. Solution adaptée à l'électrification rurale ;
- 121. Réduction de l'utilisation des groupes électrogènes diesel.

4.4.2. Production d'hydrogène à partir de déchets agricoles

Les résidus agricoles tels que les pelures de manioc, les balles de riz et les tiges de maïs peuvent être transformés en hydrogène par gazéification de la biomasse.

Avantages :

- 122. Gestion des déchets ;
- 123. Création d'emplois ;
- 124. Production locale d'énergie.

4.4.3. Petits systèmes décentralisés

De petites unités de production d'hydrogène peuvent être installées dans les villages, les exploitations agricoles ou les petites industries.

Avantages :

- 125. Systèmes énergétiques indépendants ;

126. Réduction du coût de transport de l'énergie ;

127. Maintenance aisée par des techniciens locaux.

Éclairage professionnel :

Les techniciens des systèmes de production d'hydrogène exercent des fonctions importantes, notamment :

128. Installer et entretenir les systèmes d'électrolyse ;

129. Garantir la purification de l'eau avant l'électrolyse ;

130. Surveiller le rendement et les performances du système ;

131. Rechercher les fuites et assurer la sécurité ;

132. Gérer les systèmes de stockage de l'hydrogène.

Ces compétences sont importantes pour les futurs emplois dans les industries de l'énergie propre.

Réfléchissez : *quelle ressource locale, solaire, eau ou biomasse, pourrait servir à produire de l'hydrogène dans votre région ? Comment cette ressource pourrait-elle améliorer l'approvisionnement énergétique de votre communauté ?*

Résumé du chapitre

L'hydrogène peut être produit selon différentes filières, notamment l'électrolyse, le vaporeformage du méthane, la gazéification de la biomasse et la pyrolyse du méthane. Chaque méthode dépend des ressources et des technologies disponibles. L'électrolyse est présentée comme la méthode la plus propre lorsqu'elle est alimentée par une énergie renouvelable, car elle produit de l'hydrogène vert sans émissions de carbone. Pour les pays africains, en particulier ceux qui disposent d'un fort ensoleillement et de ressources agricoles, la production d'hydrogène vert offre une solution durable et pratique. Les systèmes de production locaux peuvent créer des emplois, améliorer l'accès à l'énergie et contribuer à la protection de l'environnement.

Questions de révision

133. Qu'est-ce que l'électrolyse ?

134. Citez deux principales méthodes de production de l'hydrogène.

135. Comparez l'électrolyse et le vaporeformage du méthane.

136. Comment les déchets agricoles peuvent-ils être utilisés pour produire de l'hydrogène ?

137. Quels sont les avantages des petits systèmes à hydrogène ?

Chapitre 5

Présentation générale des applications de l'hydrogène (H2-B1-5)

5.1. Introduction

L'hydrogène est un vecteur énergétique flexible qui peut être utilisé dans de nombreux secteurs de l'économie. Il peut fournir de l'électricité, alimenter des véhicules et soutenir des procédés industriels. En raison de son caractère propre et de sa capacité à stocker l'énergie, l'hydrogène joue un rôle important dans la transition vers des systèmes énergétiques durables. Contrairement aux combustibles fossiles, il peut être utilisé dans des piles à combustible sans produire d'émissions nocives directes. Il convient donc aux pays qui souhaitent réduire la pollution et améliorer l'accès à l'énergie. En Afrique de l'Ouest, l'hydrogène peut soutenir le développement des zones rurales et urbaines en apportant des solutions énergétiques fiables et propres.

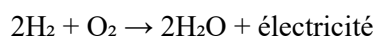
5.2. Production d'électricité

L'hydrogène peut être utilisé pour produire de l'électricité de manière propre et efficace. La pile à combustible constitue l'une des principales technologies employées.

a) Production d'électricité par les piles à combustible

Une pile à combustible convertit l'hydrogène en électricité par une réaction chimique avec l'oxygène, comme l'illustre la figure 5.1.

Procédé : hydrogène + oxygène → électricité + eau



Avantages :

- 138. Énergie propre : seule de l'eau est produite ;
- 139. Fonctionnement silencieux ;
- 140. Rendement élevé.

Illustration : une pile à combustible fonctionne comme une batterie qui continue de produire de l'électricité tant qu'elle est alimentée en hydrogène.

b) Systèmes de secours pour les mini-réseaux

L'hydrogène peut servir de source d'énergie de secours pour les mini-réseaux des zones rurales. Lorsque l'énergie solaire ou éolienne n'est pas disponible, l'hydrogène stocké peut être utilisé pour produire de l'électricité.

Exemple :

Journée : énergie solaire → production d'hydrogène

Nuit : hydrogène → électricité

Avantages :

- 141. Alimentation électrique fiable ;
- 142. Soutien à l'électrification rurale ;
- 143. Réduction des interruptions d'alimentation.

c) Remplacement des groupes électrogènes diesel

De nombreuses communautés et entreprises africaines utilisent des groupes électrogènes diesel. Ces groupes sont coûteux et polluent l'environnement. Des piles à combustible à hydrogène peuvent les remplacer.

Avantages :

- 144. Absence de pollution atmosphérique au point d'utilisation ;
- 145. Niveau sonore plus faible ;
- 146. Réduction du coût du combustible au fil du temps.

La figure 5.1 représente un système électrique à pile à combustible à hydrogène selon le procédé suivant : l'hydrogène entre dans la pile à combustible → de l'électricité est produite → de l'eau est rejetée.

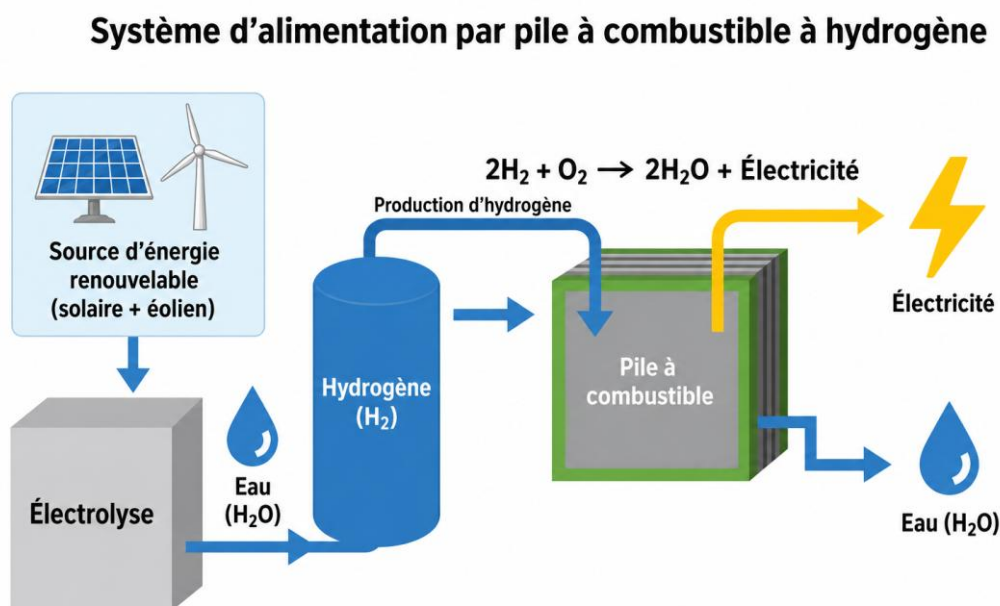


Figure 5.1. Application de l'hydrogène à la production d'électricité

5.3. Applications dans les transports

L'hydrogène est de plus en plus utilisé dans les transports comme solution de remplacement propre aux combustibles classiques.

a) Autobus et camions à hydrogène

Les autobus et les camions à hydrogène utilisent des piles à combustible pour produire l'électricité nécessaire à leur propulsion. Ces véhicules conviennent aux longues distances et aux charges lourdes.

Avantages :

- 147. Ravitaillement rapide ;
- 148. Grande autonomie ;
- 149. Réduction des émissions.

b) Véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)

Les véhicules électriques à pile à combustible (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) utilisent de l'hydrogène à la place de batteries pour produire de l'électricité.

Exemples :

- 150. Voitures à hydrogène ;

151. Véhicules de livraison ;

152. Véhicules utilitaires.

Avantages :

153. Zéro émission à l'échappement ;

154. Performances efficaces ;

155. Solution adaptée aux déplacements urbains et interurbains.

c) Transports publics propres

L'hydrogène peut améliorer les systèmes de transport public en réduisant la pollution dans les villes. Les autobus à hydrogène, par exemple, réduisent les fumées et améliorent la qualité de l'air. Dans les villes africaines dont la population augmente, le transport à l'hydrogène peut :

156. Réduire la pollution liée à la circulation ;

157. Améliorer la santé publique ;

158. Créer des systèmes de transport modernes.

La figure 5.2 illustre le système de transport à hydrogène :

Réservoir d'hydrogène → pile à combustible → moteur → déplacement du véhicule

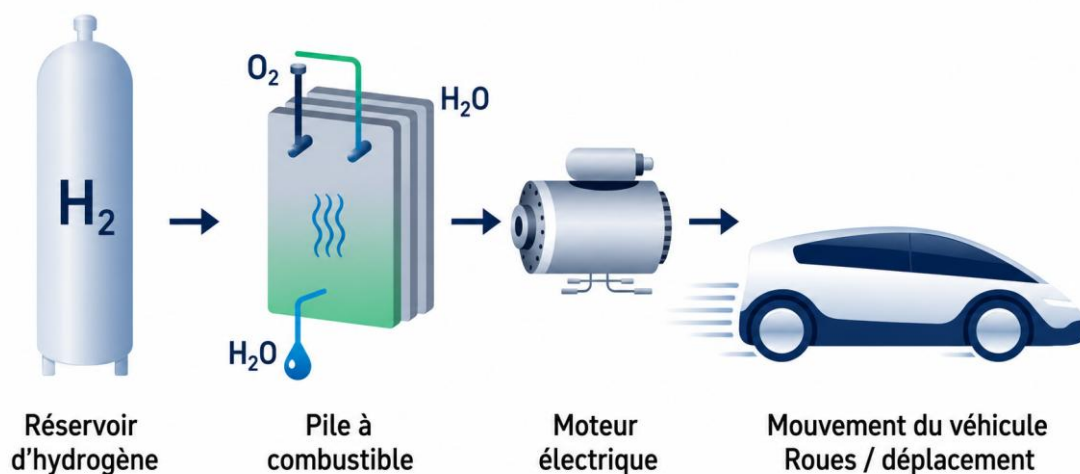


Figure 5.1. Système de transport à hydrogène pour la chaîne de traction d'un FCEV

5.4. Applications industrielles

L'hydrogène est largement utilisé dans l'industrie, à la fois comme matière première et comme source d'énergie propre. L'une de ses principales utilisations est la production d'engrais : l'hydrogène est associé à l'azote de l'air pour produire de l'ammoniac (NH_3). L'ammoniac est indispensable à la fabrication d'engrais qui améliorent la fertilité des sols et augmentent les rendements agricoles. Cette application soutient directement l'agriculture, secteur essentiel dans de nombreux pays africains.

L'hydrogène est également utilisé dans la production d'acier comme solution plus propre que le charbon. Les procédés sidérurgiques classiques rejettent de grandes quantités de dioxyde de carbone, tandis que l'utilisation de l'hydrogène peut réduire considérablement ces émissions. Elle permet ainsi une production plus propre et contribue aux efforts de réduction de la pollution de l'environnement.

En outre, l'hydrogène joue un rôle important dans le raffinage du pétrole. Il sert à éliminer des impuretés telles que le soufre dans des combustibles comme le gazole et l'essence. Cela améliore la qualité des combustibles et réduit les émissions nocives. Pour les apprenants de l'EFTP, ces applications industrielles mettent en évidence des possibilités professionnelles dans l'exploitation des installations, la maintenance et la gestion de la sécurité des industries modernes.

5.5. Cas d'usage locaux en Afrique de l'Ouest

L'hydrogène peut également répondre de manière pratique aux besoins locaux en Afrique, en particulier dans les régions où l'accès à l'énergie et le développement économique constituent des priorités.

H₂ pour l'électrification rurale : dans le domaine de l'électrification rurale, l'hydrogène peut contribuer à fournir de l'électricité aux communautés hors réseau. L'énergie solaire peut, par exemple, servir à produire de l'hydrogène par électrolyse pendant la journée. L'hydrogène est ensuite stocké, puis reconverti en électricité lorsqu'elle est nécessaire, notamment la nuit. Cela améliore l'accès à une alimentation électrique fiable pour les habitations, les écoles et les services de santé.

H₂ pour la transformation agricole : l'hydrogène peut alimenter des machines utilisées pour moudre les céréales, sécher les récoltes et transformer le manioc. Il accroît ainsi la productivité, réduit les pertes après récolte et crée des possibilités d'emploi dans les zones rurales.

H₂ pour des systèmes de transport propres : les autobus et véhicules de livraison à hydrogène peuvent remplacer les véhicules diesel dans les villes. Cela réduit la pollution atmosphérique et, à terme, les coûts de combustible, tout en favorisant un transport urbain plus durable.

Avantages :

- 159. Réduction de la pollution ;
- 160. Réduction des coûts de combustible ;
- 161. Transport urbain durable.

La figure 5.2 présente un système local d'application de l'hydrogène selon le procédé suivant :

Solaire → hydrogène → électricité, transport et transformation agricole

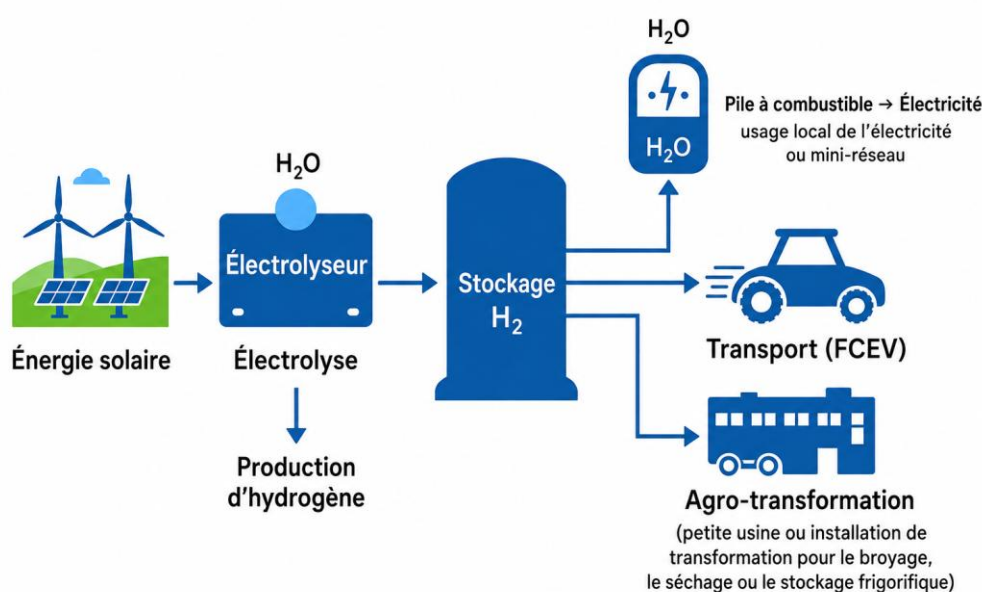


Figure 5.2. Système local d'application de l'hydrogène

Légende française des libellés de l'image : Solar Energy = énergie solaire ; Electrolysis = électrolyse ; Hydrogen Storage = stockage de l'hydrogène ; Fuel Cell + Electricity = pile à combustible + électricité ; Transport (FCEV) = transport (FCEV) ; Agro-processing = transformation agricole.

Éclairage professionnel : les techniciens sont nécessaires dans les applications de l'hydrogène pour exercer les fonctions suivantes :

- 162. Installation et maintenance des piles à combustible ;
- 163. Intégration des systèmes, c'est-à-dire raccordement des systèmes à hydrogène aux systèmes électriques ou de transport ;
- 164. Opérations de sécurité : manipulation sûre de l'hydrogène et prévention des fuites ;
- 165. Surveillance des performances et du rendement des systèmes.

Ces fonctions sont importantes pour constituer une main-d'œuvre qualifiée dans l'économie de l'hydrogène.

Réfléchissez : *quelle application de l'hydrogène aurait le plus grand impact dans votre pays ? S'agirait-il de la production d'électricité, des transports ou d'une utilisation industrielle ? Pourquoi ?*

Résumé du chapitre

L'hydrogène présente de nombreuses applications dans la production d'électricité, les transports et l'industrie. Il peut servir à produire de l'électricité propre au moyen de piles à combustible, à alimenter des véhicules tels que des autobus et des voitures et à soutenir des industries comme la fabrication d'engrais et la production d'acier. En Afrique de l'Ouest, l'hydrogène peut améliorer l'électrification rurale, soutenir la transformation agricole et fournir des solutions de transport propres. Sa flexibilité et ses avantages environnementaux en font une solution énergétique importante pour l'avenir.

Questions de révision

- 166. Comment les piles à combustible produisent-elles de l'électricité ?
- 167. Citez deux utilisations de l'hydrogène dans les transports.
- 168. Pourquoi l'hydrogène est-il utile dans l'industrie ?
- 169. Donnez un exemple d'utilisation de l'hydrogène pour produire de l'électricité.
- 170. Comment l'hydrogène peut-il soutenir l'électrification rurale ?
- 171. Quels rôles les techniciens jouent-ils dans les applications de l'hydrogène ?

H2-B2 : Sécurité de l'hydrogène et sensibilisation aux risques

H2-B2 : SÉCURITÉ DE L'HYDROGÈNE ET SENSIBILISATION AUX RISQUES

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

À la fin de ce chapitre, les apprenants seront capables de :

- Identifier les dangers et les risques liés à l'hydrogène ;
- Expliquer les normes de sécurité et les principes de manipulation sûre ;
- Reconnaître les procédures d'intervention d'urgence ;
- Citer trois outils disponibles localement pour détecter les fuites d'hydrogène dans les ateliers d'Afrique de l'Ouest.

CHAPITRE 1

H2-B2-1 – PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES LIÉES À LA SÉCURITÉ

1.1. Introduction

L'hydrogène est très différent des combustibles courants tels que le gazole et le GPL (gaz de pétrole liquéfié, utilisé notamment comme gaz de cuisson). Comme son comportement est différent, les anciennes méthodes de travail peuvent devenir dangereuses si elles ne sont pas adaptées. Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, notamment au Nigeria, au Ghana et au Sénégal, les techniciens connaissent déjà les groupes électrogènes diesel, les bouteilles de GPL et les systèmes de stockage de combustible. Ces combustibles ont une forte odeur, produisent des flammes visibles et présentent un comportement plus prévisible. Par exemple, une fuite de gazole forme une nappe visible au sol, une fuite de GPL peut souvent être détectée à l'odeur et les flammes de ces combustibles sont faciles à voir. L'hydrogène, en revanche, ne se comporte pas ainsi. Il est inodore et incolore, et brûle avec une flamme très difficile à voir, surtout en plein jour. Il se déplace aussi très rapidement et monte. Une fuite peut donc se produire sans être remarquée et un incendie peut être présent sans être clairement visible.

De ce fait, de nombreuses habitudes courantes des techniciens peuvent devenir dangereuses. Par exemple, rechercher une fuite de gaz à l'odeur, repérer uniquement les flammes visibles ou concentrer l'inspection au niveau du sol sont des méthodes qui peuvent fonctionner avec le GPL ou le gazole, mais qui ne sont pas fiables pour l'hydrogène. Au Ghana, par exemple, un technicien pourrait n'inspecter que le sol alors que l'hydrogène s'est déjà élevé et accumulé près de la toiture, créant un danger caché. Le travail avec l'hydrogène exige donc une nouvelle manière de raisonner. Les techniciens doivent penser vers le haut plutôt que vers le bas, utiliser des instruments appropriés au lieu de se fier à leur odorat et toujours supposer qu'une fuite peut être présente, même si elle n'est pas évidente. La sécurité dépend de la compréhension du comportement de l'hydrogène, du respect des procédures adéquates et de l'abandon des suppositions fondées sur l'expérience d'autres combustibles. Comprendre les propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène constitue donc la première étape, et la plus importante, pour travailler en sécurité. Lorsque les techniciens maîtrisent ces propriétés, ils peuvent prévenir les accidents, protéger les personnes et les équipements, et intervenir avec assurance sur les systèmes énergétiques modernes. L'hydrogène peut être utilisé en toute sécurité, à condition d'être correctement compris et manipulé avec précaution.

1.2. Principales propriétés de l'hydrogène liées à la sécurité

L'hydrogène possède cinq propriétés importantes que tout technicien doit connaître :

- **Gaz très léger** : l'hydrogène est le gaz le plus léger. Lorsqu'il fuit, il ne reste pas au sol ; il monte très rapidement vers le plafond ou la toiture.
- **Incolore et inodore** : l'hydrogène n'a ni couleur ni odeur. Il est donc impossible de le voir ou de le sentir en cas de fuite.
- **Très inflammable** : l'hydrogène s'enflamme très facilement. Une étincelle minuscule peut déclencher un incendie. Dans les ateliers d'Afrique de l'Ouest, des étincelles peuvent notamment provenir d'un câblage défectueux, des commandes d'un groupe électrogène ou de chargeurs de téléphone.
- **Flamme presque invisible** : lorsque l'hydrogène brûle, sa flamme est bleu pâle. En plein jour, elle est presque invisible. Une flamme peut se trouver juste devant vous sans être clairement perceptible.
- **Large domaine d'inflammabilité** : l'hydrogène peut brûler même lorsqu'il n'est présent qu'en faible proportion dans un mélange avec l'air. Un mélange dangereux peut donc se former plus facilement.

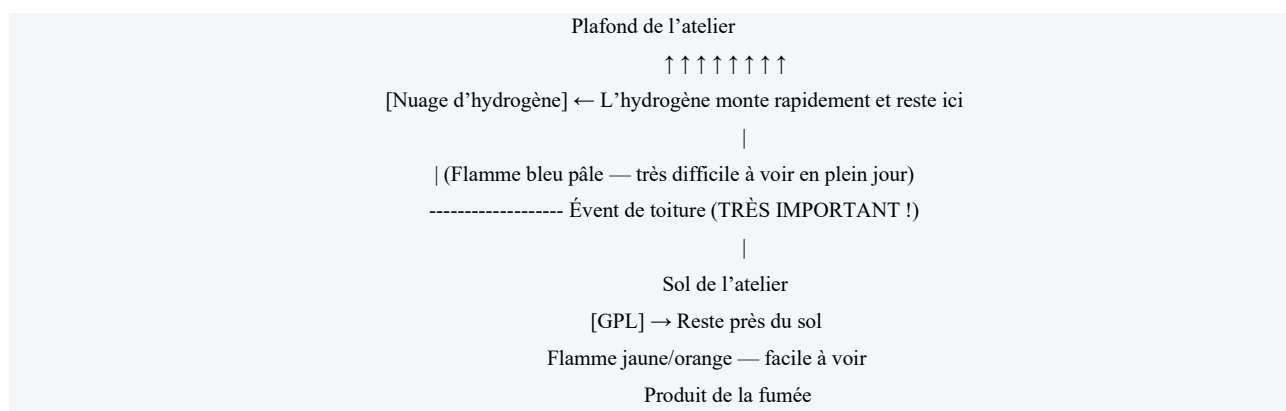
1.3. Pourquoi ces propriétés sont-elles importantes en Afrique de l'Ouest ?

De nombreux ateliers d'Afrique de l'Ouest sont chauds, mal ventilés et parfois encombrés. Ces conditions peuvent accroître le risque lié à l'hydrogène. Exemple — Atelier dans le nord du Nigeria : le soleil rend l'atelier très chaud. L'air chaud monte et l'hydrogène monte encore plus vite. En l'absence d'une bonne ventilation au niveau de la toiture, l'hydrogène peut s'accumuler près du plafond. Une seule petite étincelle peut alors provoquer un incendie ou une explosion de grande ampleur. Autre exemple — Petit garage au Sénégal : un technicien peut n'inspecter que le sol à la recherche de fuites, comme il le fait avec le GPL. Or, une fuite d'hydrogène se trouvera au-dessus de sa tête, près de la toiture. Il risque donc de ne pas détecter le danger.

1.4. Règles de sécurité essentielles

- Toujours inspecter d'abord les points hauts : toiture, plafond et partie supérieure des conduites ;
- Installer des événements de toiture ou des ventilateurs afin de permettre l'évacuation de l'hydrogène ;
- Ne jamais se fier à son nez ou à ses yeux pour rechercher une fuite ;
- Tenir toute source d'inflammation à l'écart des équipements utilisant de l'hydrogène ;
- En cas de doute, toujours supposer qu'une fuite peut être présente.

Figure 1.1 : Comportements comparés de l'hydrogène et du GPL



D'après la figure 1.2, on peut observer que :

- **Flamme d'hydrogène** : presque invisible → bleu pâle, sans fumée ;
- **Flamme de GPL** : jaune-orangé vif → facile à voir, produit de la suie.

Illustration comparant une flamme d'hydrogène bleu pâle à une flamme de GPL jaune-orangé. do the same for these images too i need each image treanslation and be seperate dont merge any images do the task one by one select second 10 images

 Hydrogène (H₂)  Couleur : presque invisible / bleu pâle Température de flamme : ~2 000–2 200 °C Vitesse de combustion : très rapide Émissions : seulement de la vapeur d'eau (H₂O)	GPL (propane/butane)   Couleur : orange-jaune vif Température de flamme : ~1 900–1 980 °C Vitesse de combustion : modérée Émissions : CO₂ + H₂O + CO possible
--	--

Figure 1.1. Flamme d'hydrogène et flamme de GPL

Tableau 1.1. Comparaison des propriétés de H₂ et du GPL

Propriété	Hydrogène	GPL
Masse volumique relative	Très léger	Plus lourd
Comportement en cas de fuite	Monte vers la toiture	Reste près du sol
Odeur	Aucune odeur	Forte odeur
Flamme	Presque invisible	Vive et facile à voir
Détection des fuites	Très difficile	Plus facile

1.5. Erreurs courantes à éviter

- Rechercher les fuites uniquement au niveau du sol ;
- Essayer de sentir le gaz ;
- Négliger la ventilation de la toiture ;
- Penser que « l'absence d'odeur signifie l'absence de problème ».

Questions de réflexion (discussion en classe)

1. Pourquoi une fuite d'hydrogène est-elle plus difficile à détecter qu'une fuite de GPL dans un atelier très actif d'Afrique de l'Ouest ?
2. Comment une mauvaise ventilation en toiture compromettrait-elle la sécurité de l'hydrogène dans un atelier chaud au Sénégal ?
3. Peut-on se fier à l'odorat pour détecter une fuite d'hydrogène ? Pourquoi ?

1.6. Résumé du chapitre

L'hydrogène est un gaz très léger, invisible et inodore, ce qui rend sa détection difficile sans instrument approprié. Lorsqu'il est libéré, il monte rapidement et tend à s'accumuler près de la toiture au lieu de rester près du sol. L'hydrogène s'enflamme aussi très facilement et brûle avec une flamme presque invisible, surtout en plein jour, ce qui augmente le risque qu'un incendie passe inaperçu. Lors de la recherche de fuites, les techniciens doivent donc toujours inspecter les points hauts, tels que les plafonds et les sections de conduites en hauteur, et pas uniquement le sol. Une bonne ventilation en toiture constitue par conséquent une mesure de sécurité essentielle : elle permet d'évacuer l'hydrogène libéré avant qu'il ne s'accumule et ne crée une situation dangereuse.

CHAPITRE 2

H2-B2-2 : RISQUES D'INCENDIE, D'EXPLOSION ET DE FUITE

2.1. Introduction

L'hydrogène est très utile, mais il peut provoquer un incendie ou une explosion s'il n'est pas manipulé avec précaution. Le principal problème est que les fuites d'hydrogène sont invisibles et se propagent très rapidement. Dans de nombreux ateliers d'Afrique de l'Ouest, les personnes sont habituées au gazole et au GPL. Avec l'hydrogène, de petites erreurs peuvent rapidement devenir dangereuses. Chaque technicien doit donc bien comprendre les risques d'incendie et d'explosion.

2.2. Principaux risques liés à l'hydrogène

Lorsque vous travaillez avec de l'hydrogène, vous devez toujours garder à l'esprit trois risques majeurs. Ils diffèrent de ceux auxquels vous êtes habitué avec le gazole ou le GPL et exigent donc une attention particulière.

a) Les petites fuites se propagent rapidement. L'hydrogène peut s'échapper par de très petites ouvertures, notamment par des trous minuscules ou des raccords desserrés. Comme il est très léger, il se déplace très vite et se disperse rapidement dans l'air.

Cela signifie que :

- Une petite fuite peut devenir un problème important en peu de temps ;
- Le gaz peut se répandre dans l'atelier avant d'être remarqué.

Par exemple, dans un petit atelier au Nigeria, un raccord de tuyauterie desserré peut sembler sans gravité. Pourtant, en quelques minutes, l'hydrogène peut remplir la partie supérieure du local.

Conseil de sécurité : serrer correctement les raccords et vérifier régulièrement les connexions.

b) Les sources d'inflammation sont omniprésentes. L'hydrogène s'enflamme très facilement. Même une petite étincelle ou une source de chaleur peut déclencher un incendie. Dans de nombreux ateliers d'Afrique de l'Ouest, les sources d'inflammation courantes comprennent :

- Un câblage électrique défectueux ;
- Les interrupteurs d'éclairage ;
- Les groupes électrogènes diesel ;
- Les chargeurs de téléphone ;
- Le choc d'outils métalliques entre eux.

Le danger peut donc être invisible, mais une étincelle peut enflammer instantanément l'hydrogène. Au Ghana, par exemple, l'actionnement d'un interrupteur dans un local mal ventilé où une fuite est présente peut provoquer un incendie.

Conseil de sécurité : maintenir les installations électriques en bon état et éviter toute étincelle à proximité des systèmes à hydrogène.

c) Une flamme invisible rend l'incendie difficile à détecter. L'hydrogène brûle avec une flamme bleu pâle très difficile à voir, en particulier pendant la journée.

Cela signifie que :

- Un feu peut brûler sans être remarqué ;
- Une personne peut pénétrer dans une flamme sans s'en rendre compte.

Contrairement aux flammes du GPL, qui sont vives et visibles, les flammes d'hydrogène sont presque invisibles. Dans un atelier, par exemple, un technicien peut ne pas voir une flamme d'hydrogène, mais ressentir soudainement de la chaleur.

Conseil de sécurité : rester vigilant. Si vous soupçonnez une fuite, ne supposez pas que la zone est sûre.

Rappel essentiel de sécurité

- Une petite fuite peut se propager rapidement ;
 - Les étincelles sont courantes dans les ateliers ;
 - Les flammes peuvent être invisibles.
- ✓ Toujours intervenir rapidement, même en cas de doute. La sécurité avant tout.

2.3. Sources d'inflammation courantes en Afrique de l'Ouest

Dans de nombreux ateliers d'Afrique de l'Ouest, des objets d'usage courant peuvent produire des étincelles ou de la chaleur. Ils peuvent paraître ordinaires, mais deviennent des sources d'inflammation très dangereuses en présence d'hydrogène. Par exemple, un câblage électrique défectueux, fréquent dans certains ateliers ghanéens, peut produire des étincelles en raison de conducteurs dénudés, de connexions desserrées ou de prises surchargées. De même, les groupes électrogènes diesel, largement utilisés dans des pays comme le Bénin, peuvent produire des étincelles au démarrage ou une chaleur importante au niveau de certaines pièces du moteur. Même les points de recharge des téléphones mobiles peuvent surchauffer et générer de petites étincelles, tandis que les anciens interrupteurs et les blocs multiprises endommagés peuvent produire des étincelles à la mise sous tension ou hors tension. Il s'agit d'équipements courants, mais ils peuvent facilement déclencher un incendie lorsque de l'hydrogène est présent.

Les sources d'inflammation courantes comprennent :

- Un câblage électrique défectueux ou des conducteurs dénudés ;
- Les étincelles provenant de groupes électrogènes diesel ;
- La surchauffe de chargeurs de téléphone ;
- Les interrupteurs anciens et les blocs multiprises endommagés.

Message clé : ne jamais oublier que des objets ordinaires de l'atelier peuvent devenir dangereux lorsque de l'hydrogène est en service. Rester vigilant à tout moment.

2.4. Règles de sécurité importantes (à respecter chaque jour)

Pour travailler en sécurité avec l'hydrogène, les techniciens doivent appliquer quotidiennement des règles strictes. Ces règles sont simples, mais essentielles à la prévention des accidents. Tout d'abord, ne jamais utiliser une flamme nue — par exemple un briquet, une allumette ou une bougie — pour rechercher une fuite, car l'hydrogène peut s'enflammer instantanément. Les installations électriques doivent toujours être maintenues en bon état : réparer immédiatement les câbles défectueux, remplacer les prises endommagées et ne pas surcharger les blocs multiprises. Lorsque cela est possible, les techniciens doivent utiliser des outils anti-étincelants afin de réduire le risque d'étincelle accidentelle. Il est également important d'afficher une signalisation de sécurité claire et visible pour que chacun connaisse le danger. Enfin, les zones où l'on travaille avec l'hydrogène doivent toujours être traitées comme des zones à risque, exigeant en permanence une vigilance et des précautions renforcées.

Règles de sécurité importantes :

- Ne jamais utiliser de flamme nue pour rechercher une fuite ;
- Maintenir les installations électriques en bon état ;

- Réparer immédiatement tout câblage défectueux ;
- Utiliser, dans la mesure du possible, des outils anti-étincelants ;
- Afficher une signalisation de sécurité claire (« Interdiction de fumer », « Flammes nues interdites ») ;
- Toujours traiter les zones où l'hydrogène est présent comme des zones à risque.

Message clé : la sécurité repose sur une discipline quotidienne. Le respect de ces règles peut prévenir les incendies, les explosions et les blessures.

Tableau 2.1. Comparaison de risques en situation réelle

Combustible	Type de fuite	Comportement	Propagation de l'incendie
Gazole	Déversement visible	Vapeurs lourdes, reste au niveau du sol	Lente
Hydrogène	Fuite invisible	Inodore, monte très rapidement	Très rapide

Il est important de comprendre en quoi l'hydrogène diffère du gazole. Les incendies impliquant de l'hydrogène se propagent beaucoup plus rapidement que les incendies de gazole ; une intervention rapide est donc très importante.

Application d'une solution savonneuse sur un raccord de tuyauterie ; des bulles signalent une fuite.

Test à la solution savonneuse

Test de détection de fuite



Figure 2.1. Essai de détection à l'eau savonneuse sur un raccord de tuyauterie

Scène d'atelier :

[Groupe électrogène] → Étincelle
 [Interrupteur] → Clic → Étincelle possible
 [Chargeur de téléphone mobile] → Surchauffe
 [Panneau « Interdiction de fumer »] ← Doit être visible

Figure 2.2. Sources d'inflammation courantes

Erreurs courantes à éviter

- Utiliser un briquet ou une allumette pour rechercher une fuite ;
- Ignorer les petites étincelles provenant d'un ancien câblage ;
- Oublier de poser des panneaux « Interdiction de fumer » ;
- Penser : « Ce n'est qu'une petite fuite, il ne se passera rien. »

Questions de réflexion

1. Pourquoi une fuite d'hydrogène est-elle plus difficile à détecter qu'une fuite de GPL dans un atelier très actif ?
2. Quelles sont les sources d'inflammation les plus courantes dans votre atelier et comment pouvez-vous les maîtriser lorsque vous utilisez de l'hydrogène ?

2.5. Résumé du chapitre

L'hydrogène se comporte très différemment de combustibles tels que le gazole et le GPL ; les techniciens doivent donc adapter leurs habitudes de travail pour rester en sécurité. C'est un gaz très léger qui monte rapidement, n'a ni couleur ni odeur et brûle avec une flamme presque invisible. En raison de ces propriétés, les fuites d'hydrogène sont difficiles à détecter et peuvent devenir très rapidement dangereuses, surtout dans les ateliers chauds et mal ventilés fréquents en Afrique de l'Ouest.

Les principaux risques liés à l'hydrogène sont la propagation rapide des fuites, la présence de nombreuses sources d'inflammation et les incendies difficiles à voir. Même une petite fuite peut rapidement se mélanger à l'air et créer une situation dangereuse. Des équipements courants, tels que des câbles défectueux, des groupes électrogènes diesel, des chargeurs de téléphone, des interrupteurs et des blocs multiprises, peuvent produire des étincelles et enflammer l'hydrogène sans avertissement.

Pour réduire ces risques, les techniciens doivent respecter en permanence des règles de sécurité strictes. Il faut notamment ne jamais utiliser de flamme nue pour rechercher une fuite, maintenir les installations électriques en bon état, utiliser si possible des outils anti-étincelants et afficher une signalisation de sécurité claire dans le lieu de travail. Surtout, les zones où l'on travaille avec l'hydrogène doivent toujours être traitées comme des zones à risque, où une attention soutenue et des procédures adéquates sont nécessaires pour prévenir les accidents et protéger les personnes.

CHAPITRE 3

H2-B2-3 : FRAGILISATION PAR L'HYDROGÈNE ET RISQUES LIÉS À LA HAUTE PRESSION

3.1. Comprendre la fragilisation par l'hydrogène

La fragilisation par l'hydrogène est un processus au cours duquel l'hydrogène affaiblit un métal. Elle se produit lorsque de très petits atomes d'hydrogène pénètrent dans la structure métallique de conduites, de réservoirs ou de raccords. En temps normal, les métaux peuvent se déformer ou s'allonger sous l'effet d'une force. Toutefois, lorsque l'hydrogène pénètre dans le métal, celui-ci peut se fragiliser, perdre sa capacité à se déformer et se fissurer soudainement sans avertissement, même dans des conditions normales de service. Ce type d'endommagement n'est pas visible de l'extérieur et diffère de la rouille ou de la corrosion.

Les atomes d'hydrogène sont extrêmement petits. Ils peuvent donc :

- Se déplacer facilement à l'intérieur du métal ;

- S'accumuler dans sa structure ;
- Favoriser des fissures internes qui se développent rapidement lorsque le métal subit une pression ou une contrainte.

Dans de nombreux ateliers, les techniciens réutilisent des matériels tels que d'anciennes bouteilles de GPL ou des conduites de compresseur d'air. Même s'ils peuvent paraître robustes, ces matériels ne sont pas conçus pour être utilisés avec de l'hydrogène et peuvent subir une défaillance inattendue.

Il est donc très important de n'utiliser que des matériaux et composants déclarés compatibles et certifiés pour le service hydrogène.

Exemple pratique :

Un atelier remplace le GPL par de l'hydrogène. Pour réduire les coûts, les anciennes conduites en acier sont réutilisées. Après quelques mois, une conduite se fissure soudainement pendant le fonctionnement normal, provoquant une fuite d'hydrogène et un risque grave d'incendie.

Vérification des acquis

Question : pourquoi une conduite métallique peut-elle paraître robuste, mais subir une défaillance lorsqu'elle est utilisée avec de l'hydrogène ?

Réponse : parce que l'hydrogène peut pénétrer dans le métal et le fragiliser, ce qui réduit sa capacité à résister aux contraintes.

L'hydrogène agit sur les matériaux au fil du temps. La figure 3.1 montre comment il peut affecter une conduite métallique résistante lorsqu'il pénètre dans le matériau. Fragilisation par l'hydrogène :

- L'hydrogène fragilise des métaux tels que l'acier ;
- Les conduites et les raccords peuvent se fissurer soudainement.

D'anciennes conduites de gaz peuvent ne pas convenir au service hydrogène.

→ Toujours vérifier la compatibilité des matériaux.

Schéma d'une conduite avant et après rupture par fragilisation due à l'hydrogène.

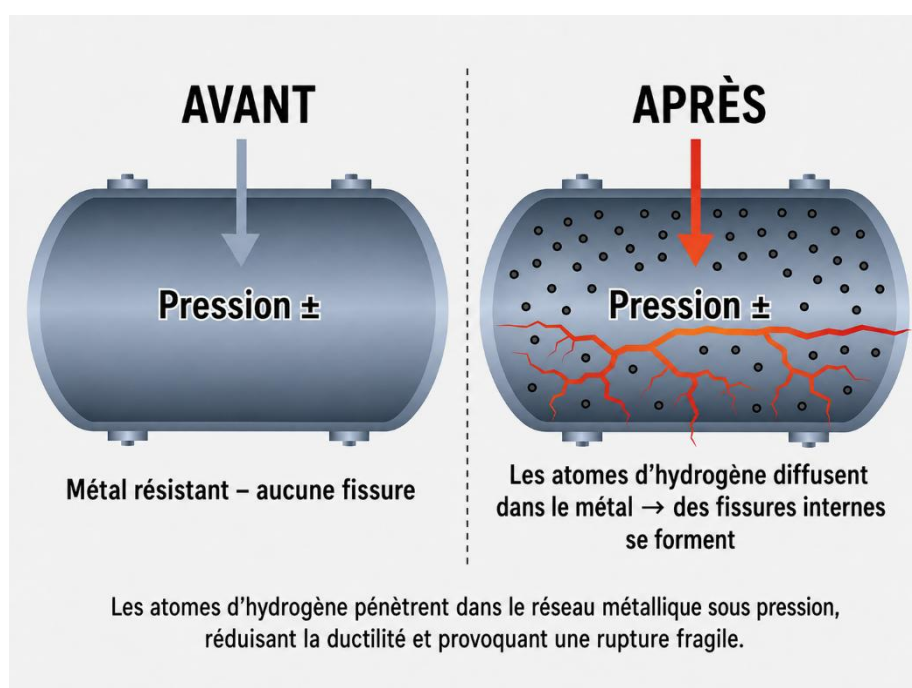


Figure 3.1. Fragilisation par l'hydrogène dans une conduite, avant et après rupture

Dans la figure 3.1, les points représentent des atomes d'hydrogène ayant pénétré dans le métal ; ces atomes ne sont pas visibles en situation réelle. La figure souligne qu'une défaillance peut survenir rapidement, même si aucun dommage n'était visible auparavant.

Risques liés à la haute pression :

- L'hydrogène est souvent stocké sous pression ;
- Une libération soudaine peut provoquer des blessures ou un traumatisme acoustique.

Pratiques de sécurité :

- Inspecter régulièrement les conduites à la recherche de fissures ;
- Éviter de réutiliser d'anciennes bouteilles de GPL ou de compresseur d'air ;
- Utiliser des composants certifiés compatibles avec l'hydrogène.

3.2. Risques liés à l'hydrogène sous haute pression

L'hydrogène gazeux est souvent stocké sous haute pression afin de réduire son volume et de gagner de l'espace. Cette pratique crée toutefois des risques importants pour la sécurité.

Si un composant tel qu'une vanne, une conduite ou un réservoir subit une défaillance soudaine, l'hydrogène peut s'échapper très rapidement. Cela peut provoquer :

- Un bruit violent et soudain (traumatisme acoustique) ;
- La projection de fragments métalliques ;
- Un jet de gaz à grande vitesse susceptible de blesser des personnes ;
- Des brûlures par le froid dues à la détente rapide du gaz ;
- Une perte d'équilibre ou un choc physique pour les travailleurs.

Même une petite fuite peut être dangereuse, car :

- L'hydrogène s'échappe avec une grande force ;
- Le gaz est invisible et inodore ;
- Il peut s'enflammer facilement au contact d'une étincelle.

Exemple pratique :

Un technicien ouvre une bouteille qui n'est pas conçue pour la pression de l'hydrogène. Un raccord se rompt soudainement et libère le gaz avec une forte détonation. De petites pièces métalliques sont projetées et surprennent les travailleurs à proximité.

Question : que peut-il se produire en cas de défaillance d'un équipement contenant de l'hydrogène sous haute pression ?

Réponse : un bruit violent, la projection de fragments et de puissants jets de gaz peuvent blesser les travailleurs ou déclencher un incendie.

3.3. Pratiques de sécurité pour prévenir les défaillances

La prévention des accidents dans les systèmes à hydrogène repose sur l'emploi de matériaux adéquats, une utilisation correcte et des inspections régulières.

Pratiques de sécurité essentielles

1. Utiliser les matériaux appropriés

- Toujours utiliser des composants certifiés pour le service hydrogène.
- Ces matériaux sont spécialement conçus pour résister aux mécanismes de dégradation applicables, notamment à la fragilisation par l'hydrogène.

2. Éviter de réutiliser d'anciens équipements

- Ne pas réutiliser de bouteilles de GPL ou de compresseur d'air.
- Elles ne sont pas conçues pour l'hydrogène et peuvent subir une défaillance rapidement.

3. Effectuer des inspections régulières

- Rechercher sur les équipements :
 - Des fissures ;
 - De la rouille ;
 - Des assemblages ou soudures endommagés.
- Calendrier d'inspection :
 - Contrôle visuel : chaque semaine ;
 - Inspection détaillée : chaque mois.

4. Respecter des procédures de travail sûres

- Vérifier la compatibilité des matériaux avant l'installation ;
- Utiliser uniquement des flexibles et raccords approuvés ;
- Ne pas modifier les équipements sans l'avis d'un expert ;
- Tenir à jour les registres d'inspection et de maintenance.

Exemple pratique :

Un technicien installe un système à hydrogène avec des conduites neuves et certifiées. Lors d'une inspection de routine, une petite fissure est détectée suffisamment tôt et réparée avant qu'un accident ne se produise.

Vérification des acquis

Question : pourquoi ne faut-il pas utiliser d'anciennes bouteilles de GPL pour stocker de l'hydrogène ?

Réponse : parce qu'elles ne sont pas conçues pour résister aux mécanismes de dégradation applicables au service hydrogène ni pour répondre aux exigences correspondantes de pression, et qu'elles peuvent subir une défaillance.

3.4. Résumé du chapitre

La fragilisation par l'hydrogène constitue un enjeu de sécurité critique dans les systèmes à hydrogène, car elle peut progressivement fragiliser certains métaux et les rendre sujets à une défaillance soudaine. Cet endommagement se produit à l'intérieur du matériau et n'est souvent pas visible de l'extérieur, ce qui accroît le risque de fissures ou de ruptures inattendues en fonctionnement normal. Par ailleurs, l'hydrogène est couramment stocké sous haute pression et toute défaillance d'un tel système peut entraîner des dangers graves, notamment une libération violente de gaz, la projection de débris et des incendies potentiels. Le risque augmente encore si des équipements incompatibles ou précédemment utilisés, tels que d'anciens composants pour GPL ou compresseur, sont réemployés pour le service hydrogène. Pour garantir la sécurité, il est essentiel d'utiliser uniquement des matériaux certifiés et compatibles avec l'hydrogène, et de procéder à des inspections régulières ; ces pratiques réduisent sensiblement la probabilité d'accidents et de défaillances du système.

CHAPITRE 4

H2-B2-4 : NORMES DE SÉCURITÉ ET PROTOCOLES SUR LE LIEU DE TRAVAIL

4.1. Normes de sécurité fondamentales pour les espaces de travail utilisant de l'hydrogène

Tout atelier ou toute station de remplissage utilisant de l'hydrogène doit appliquer des règles de sécurité simples mais strictes. Elles protègent les travailleurs et préviennent les incendies ou les explosions. Les quatre exigences fondamentales de sécurité sont :

1. Une ventilation adéquate ;
2. Une signalisation de sécurité claire ;
3. L'utilisation correcte des équipements de protection individuelle (EPI ; *PPE* dans la source) ;
4. Des programmes d'inspection réguliers.

Une ventilation adéquate est présentée comme l'exigence la plus importante. L'hydrogène monte vers la toiture ; des événements ou des ventilateurs en hauteur doivent donc évacuer le gaz libéré avant qu'il ne s'accumule. Une signalisation de sécurité claire rappelle à chacun les dangers et les mesures à prendre. Les EPI protègent le corps contre les effets d'une fuite, les étincelles ou une libération soudaine de gaz. Les inspections périodiques permettent de repérer les problèmes à un stade précoce, avant qu'ils ne deviennent graves.

Pour harmoniser les pratiques de sécurité, de nombreux pays suivent des normes internationales, notamment :

- **ISO 22734** — Électrolyseurs utilisant l'eau pour la production d'hydrogène — Exigences de sécurité ;
- **IEC 60079** — Série de normes relative aux atmosphères explosives, particulièrement importante pour les ateliers utilisant de l'hydrogène.

Le respect de ces normes aide les ateliers d'Afrique de l'Ouest à travailler de manière sûre et professionnelle. Dans cette région, de nombreux ateliers sont petits et chauds. L'application de ces exigences transforme un espace à risque en un lieu de travail plus sûr. Les ignorer peut provoquer des accidents, même en présence de faibles quantités d'hydrogène.

Exemple/scénario pratique :

Dans un petit atelier d'Accra, au Ghana, un technicien installe un système à hydrogène pour alimenter des outils. Il ajoute des événements de toiture, pose des panneaux « Hydrogène en service » et « Interdiction de fumer », fournit des EPI à tous les travailleurs et établit une liste de contrôle mensuelle. Un jour, une petite fuite se produit, mais le ventilateur de toiture évacue rapidement le gaz et aucun incendie ne se déclare.

Question : pourquoi une ventilation adéquate en toiture est-elle présentée comme l'exigence fondamentale de sécurité la plus importante pour l'hydrogène ?

Réponse : l'hydrogène est très léger et monte rapidement vers le plafond. Une bonne ventilation évacue le gaz avant qu'il ne s'accumule et ne crée un risque d'incendie.

4.2. Équipements de protection individuelle (EPI) pour le travail avec l'hydrogène

Les équipements de protection individuelle (EPI) sont les vêtements et dispositifs qui protègent le corps. Selon la source, lors d'un travail avec de l'hydrogène, les EPI minimaux à porter sont des chaussures de sécurité, des gants et une protection oculaire.

Les chaussures de sécurité protègent les pieds contre la chute d'outils ou de bouteilles. Les gants protègent les mains contre les arêtes vives, le gaz froid ou les petites fuites. La protection oculaire — lunettes de sécurité ou écran facial — protège les yeux contre les étincelles ou une libération soudaine de gaz susceptible de provoquer une lésion ou une cécité temporaire.

Les EPI ne sont efficaces que s'ils sont portés correctement à chaque intervention et maintenus en bon état. Remplacer immédiatement les gants endommagés ou les lunettes fissurées. Dans les ateliers chauds d'Afrique de l'Ouest, choisir des EPI légers mais résistants que les travailleurs porteront effectivement.

Exemple/scénario pratique : dans une station de remplissage d'hydrogène à Abidjan, en Côte d'Ivoire, un travailleur oublie de porter des lunettes de sécurité lorsqu'il change une bouteille. Une petite libération sous haute pression projette de la poussière et du gaz vers ses yeux. Il souffre d'une irritation oculaire et ne peut pas travailler pendant deux jours. À la suite de cet incident, le responsable intègre une vérification quotidienne des EPI à la routine du matin.

Question : quels sont les EPI minimaux que tout technicien doit porter lorsqu'il travaille avec de l'hydrogène ?

Réponse : des chaussures de sécurité, des gants et une protection oculaire.

4.3. Protocoles sur le lieu de travail adaptés aux conditions de l'Afrique de l'Ouest

Les ateliers d'Afrique de l'Ouest font face à des difficultés particulières. En Côte d'Ivoire, de nombreux ateliers sont encombrés de personnes et d'outils. Les systèmes à hydrogène doivent être installés dans une zone séparée, clairement signalée et éloignée des zones très fréquentées afin de réduire le risque.

Au Nigeria, les coupures de courant sont très fréquentes. Les techniciens doivent connaître les procédures de mise à l'arrêt en sécurité, arrêter les équipements à hydrogène en toute sécurité et ventiler la zone avant de partir. Ne jamais laisser fonctionner un système à hydrogène sans alimentation électrique ni surveillance.

Règles quotidiennes essentielles que chacun doit respecter :

- Toujours identifier clairement les conduites et les bouteilles d'hydrogène au moyen de panneaux « Hydrogène » ;
- Ne jamais stocker les bouteilles d'hydrogène à proximité de sources de chaleur telles que les groupes électrogènes ou les cuisinières ;
- Toujours maintenir les issues de secours dégagées ; ne jamais les bloquer avec des équipements ou des cartons.

Ces protocoles simples contribuent à empêcher que de petits problèmes ne deviennent des accidents graves.

Étude de cas d'accident réel (enseignements tirés) : en 2022, une petite station de remplissage d'hydrogène en Europe a subi un grave incendie. L'issue de secours était bloquée par des bouteilles vides et les travailleurs n'ont pas pu évacuer rapidement. L'incendie a provoqué d'importants dégâts et des blessures.

Enseignement tiré : toujours maintenir les issues de secours entièrement dégagées. Une issue bloquée peut transformer un incident mineur en tragédie. Cette erreur peut facilement se produire dans les ateliers encombrés d'Afrique de l'Ouest.

Exemple/scénario pratique : lors d'une coupure de courant soudaine à Lagos, au Nigeria, un technicien met rapidement le système à hydrogène à l'arrêt conformément à la procédure affichée, ouvre les événements de toiture et fait sortir les travailleurs. Les issues de secours étant restées dégagées et les bouteilles correctement identifiées, personne n'est blessé et l'atelier redémarre sans incident après le rétablissement de l'alimentation électrique.

Schéma d'implantation correcte d'un atelier équipé d'un système à hydrogène.

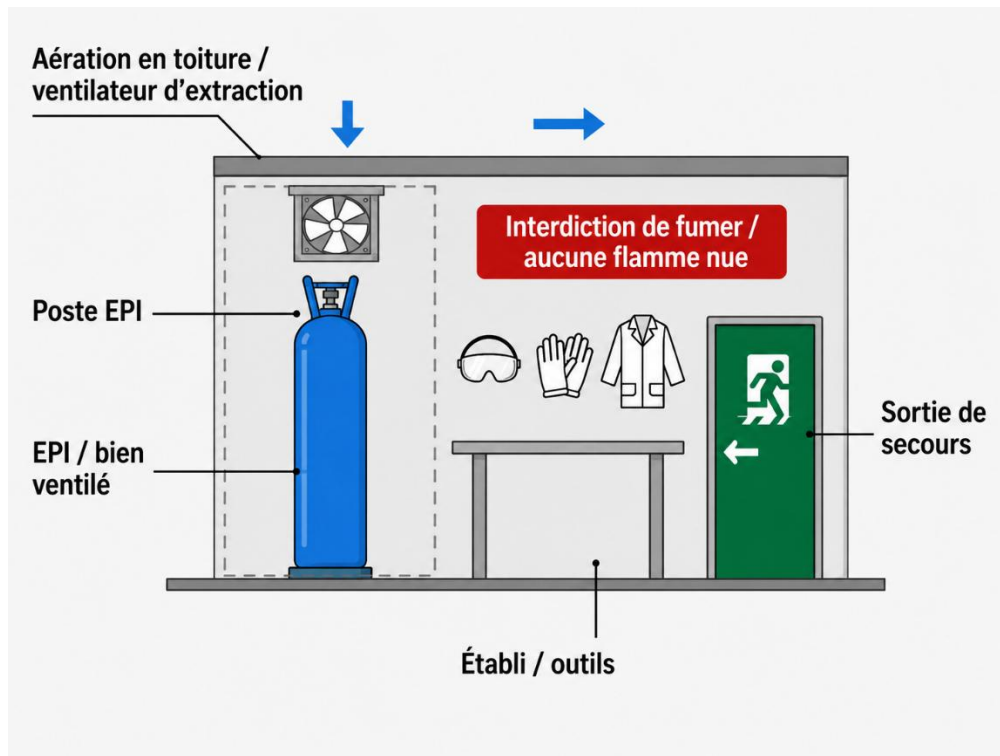


Figure 4.1. Implantation correcte d'un lieu de travail équipé d'un système à hydrogène

Question : que doit faire en premier un technicien lors d'une coupure de courant alors que l'équipement à hydrogène fonctionne ?

Réponse : appliquer la procédure de mise à l'arrêt en sécurité, arrêter correctement l'équipement et ventiler la zone.

4.4. Résumé du chapitre

Tout espace de travail utilisant de l'hydrogène doit appliquer des pratiques de sécurité essentielles pour réduire les risques et assurer un fonctionnement régulier. Une ventilation adéquate, une signalisation d'avertissement claire, l'utilisation des équipements de protection individuelle (EPI) et des inspections régulières constituent des exigences fondamentales dans tout environnement où de l'hydrogène est présent. Les travailleurs doivent toujours porter les EPI de base — chaussures de sécurité, gants et protection oculaire — afin de limiter les blessures. Dans les ateliers très actifs ou encombrés, comme ceux que l'on trouve en Côte d'Ivoire, les systèmes à hydrogène doivent être séparés des autres activités pour éviter toute interférence accidentelle. Il est également important de préparer des procédures de mise à l'arrêt en sécurité, surtout dans des régions comme le Nigeria où les coupures de courant sont fréquentes, afin d'éviter les situations incontrôlées. En outre, toutes les conduites d'hydrogène doivent être clairement identifiées, les bouteilles doivent être stockées loin des sources de chaleur et les issues de secours doivent toujours rester dégagées. L'application de protocoles de sécurité appropriés et de bonnes habitudes de travail quotidiennes permet de prévenir efficacement la plupart des accidents liés à l'hydrogène.

Questions de révision de fin de chapitre

I. Vrai ou faux

1. Dans un atelier chaud au Sénégal, il suffit de rechercher les fuites d'hydrogène au niveau du sol, car l'hydrogène est un gaz lourd.
2. Il est sans danger de stocker des bouteilles d'hydrogène près d'un groupe électrogène diesel ou de toute autre source de chaleur, à condition qu'elles soient étiquetées.

II. Questions à choix multiple

1. Vous travaillez dans un atelier encombré à Abidjan, en Côte d'Ivoire. Quelle est la manière la plus sûre d'installer le système à hydrogène ?
 - A. Placer la bouteille d'hydrogène au milieu de la zone de travail très fréquentée ;
 - B. Installer le système à hydrogène dans une zone séparée, clairement signalée et éloignée des personnes ;
 - C. Placer la bouteille près de la porte pour y accéder facilement ;
 - D. La stocker à côté du groupe électrogène pour gagner de la place.
2. À Lagos, au Nigeria, un technicien s'apprête à intervenir sur un groupe électrogène alimenté à l'hydrogène. Quels EPI doit-il porter au minimum ?
 - A. Uniquement des bottes en caoutchouc ;
 - B. Des chaussures de sécurité, des gants et une protection oculaire ;
 - C. Un masque facial et des vêtements ordinaires ;
 - D. Un casque et des bouchons d'oreille uniquement.
3. Vous constatez que l'issue de secours de votre atelier est bloquée par des caisses à outils et des pièces de rechange. Quelle est la bonne action ?
 - A. Ne rien changer parce que vous êtes très occupé ;
 - B. Dégager immédiatement l'issue et veiller à ce qu'elle reste libre en permanence ;
 - C. La bloquer uniquement pendant la journée et la dégager la nuit ;
 - D. Poser un panneau indiquant « Issue bloquée — utiliser la fenêtre ».

III. Mise en situation pratique

1. Lors d'une coupure de courant soudaine dans un atelier d'Accra, au Ghana, le système de secours à hydrogène fonctionne toujours. Que doit faire le technicien en premier ?
2. Dessinez un schéma simple d'une implantation sûre d'atelier utilisant de l'hydrogène — ou décrivez-la avec des mots. Identifiez au moins quatre dispositifs de sécurité importants.

CHAPITRE 5

NOTIONS FONDAMENTALES DE DÉTECTION DES FUITES ET INTERVENTION D'URGENCE (H2-B2-5)

5.1. Introduction à la détection des fuites

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les apprenants seront capables de :

- Expliquer l'importance de la détection des fuites d'hydrogène ;
- Identifier des méthodes simples et abordables de détection des fuites ;
- Décrire les étapes de l'intervention d'urgence en cas de fuite d'hydrogène ;
- Appliquer des pratiques de sécurité fondamentales dans des situations réelles d'atelier.

5.1. Introduction

L'hydrogène est un gaz particulier : il est invisible et inodore. Il est également très inflammable, ce qui signifie qu'il s'enflamme très facilement. Comme il est invisible et sans odeur, une fuite d'hydrogène est très difficile à repérer. Une petite fuite peut se propager rapidement dans l'air. Si le gaz rencontre une étincelle, une flamme ou une surface chaude, il peut soudainement provoquer un incendie, voire une explosion. Ce comportement différencie l'hydrogène des combustibles que vous connaissez peut-être déjà, tels que le gazole ou le GPL, et impose des mesures de maîtrise particulières.

La détection précoce des fuites est donc très importante. Une fuite repérée rapidement peut être arrêtée avant de blesser des personnes ou d'endommager les équipements. De bonnes habitudes de sécurité peuvent sauver des vies et protéger votre atelier.

5.2. Méthodes fondamentales de détection des fuites d'hydrogène

5.2.1. Essai à l'eau savonneuse (méthode la plus recommandée dans la source)

L'essai à l'eau savonneuse est présenté dans la source comme la méthode la plus simple, la moins coûteuse et la plus recommandée pour rechercher les fuites d'hydrogène dans les ateliers. Selon la source, c'est la méthode que la plupart des techniciens d'Afrique de l'Ouest devraient utiliser chaque jour.

Principe :

Mélanger du savon ordinaire avec de l'eau propre dans un pulvérisateur ou un petit récipient. Appliquer l'eau savonneuse sur l'ensemble des joints de conduites, vannes, raccords et connexions. Observer ensuite attentivement. La formation et le grossissement de bulles indiquent que de l'hydrogène s'échappe à cet endroit. Les bulles apparaissent parce que le gaz qui fuit traverse le film savonneux.

Cette méthode est très répandue parce que :

- Elle est très économique : seuls du savon et de l'eau sont nécessaires ;
- Elle est simple et facile à employer ;
- Les produits nécessaires sont disponibles sur tous les marchés locaux.

Elle ne nécessite ni électricité ni outils particuliers. Même dans les ateliers ruraux dépourvus d'électricité, il est possible de réaliser cet essai rapidement.

Conseil important : inspecter les points hauts — près de la toiture — ainsi que les raccords situés plus bas, car l'hydrogène monte.

5.2.2. Détection à l'écoute

La détection à l'écoute est une autre méthode simple de recherche des fuites d'hydrogène.

Principe :

Écouter attentivement pour repérer un sifflement provenant des conduites, des vannes ou des connexions. Ce son apparaît généralement lorsque de l'hydrogène sous pression s'échappe.

Limites :

Cette méthode est peu fiable dans les ateliers très actifs d'Afrique de l'Ouest. Ces lieux sont souvent bruyants en raison des groupes électrogènes, des machines et des personnes au travail. Les petites fuites peuvent aussi produire très peu de bruit, voire aucun ; elles peuvent donc facilement passer inaperçues.

Pour ces raisons, la détection à l'écoute ne doit être utilisée qu'en complément d'un essai à l'eau savonneuse et jamais comme méthode unique.

5.2.3. Détecteurs de gaz portatifs

Les détecteurs de gaz portatifs sont des appareils électroniques capables de détecter la présence d'hydrogène dans l'air.

Principe :

Mettre le détecteur en marche et le déplacer près des conduites, des raccords et des équipements. Si de l'hydrogène est présent, l'appareil déclenche une alarme : il émet un signal sonore puissant ou un signal lumineux pour avertir l'utilisateur.

Avantages :

- Cette méthode est plus précise que la détection à l'écoute ;
- Elle peut repérer de très petites fuites qu'il est impossible de voir ou d'entendre.

Limites :

- Les détecteurs de bonne qualité peuvent être coûteux ;
- Ils nécessitent des piles ou batteries et une maintenance régulière ;
- Les utilisateurs doivent être formés à leur emploi correct.

Dans de nombreux petits ateliers, l'essai à l'eau savonneuse reste la méthode principale. Lorsqu'ils sont disponibles, les détecteurs portatifs constituent un outil de sécurité supplémentaire utile.

5.3. Outils de détection des fuites disponibles localement (contexte ouest-africain)

Dans de nombreux ateliers d'Afrique de l'Ouest, la source indique qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'équipements coûteux pour détecter les fuites d'hydrogène. Voici les outils courants et utiles qui peuvent être disponibles localement :

- **Savon et eau dans un pulvérisateur :** il s'agit de la méthode la moins coûteuse et la plus courante. Le savon et l'eau sont disponibles sur tous les marchés. La source la présente comme le meilleur outil pour l'utilisation quotidienne.
- **Pulvérisateur réutilisé ou applicateur de solution moussante :** il est possible de le fabriquer soi-même à partir d'un ancien pulvérisateur domestique ou acheté au marché. Il est réutilisable et fonctionne avec la solution savonneuse.
- **Détecteur électronique de gaz de base :** ces petits appareils électroniques sont vendus par certains revendeurs de panneaux solaires et magasins d'électronique dans les grandes villes. Certains peuvent détecter plusieurs types de gaz. Ils sont plus coûteux, mais très utiles s'ils sont accessibles.

- **Détecteurs ultrasonores de fuites (facultatifs) :** ils sont peu courants dans les petits ateliers, mais peuvent être disponibles dans les grandes villes. Ils aident à repérer de très petites fuites.

Conseil pratique : commencez par vous entraîner à l'essai à l'eau savonneuse jusqu'à bien maîtriser la méthode. Plus tard, à un niveau supérieur, vous pourrez apprendre à utiliser des détecteurs électroniques.

5.4. Intervention d'urgence en cas de fuite d'hydrogène

Règle essentielle

Ne jamais paniquer et ne jamais actionner d'interrupteur électrique pendant une fuite d'hydrogène.

Lorsque vous découvrez une fuite d'hydrogène, vous devez agir rapidement, mais calmement. Suivez les étapes simples ci-dessous, dans l'ordre :

Intervention d'urgence étape par étape

1. **Ne pas paniquer :** rester calme et réfléchir clairement. La panique peut provoquer des erreurs.
2. **Arrêter la source — si cela peut être fait en sécurité :** fermer la vanne ou arrêter le système, mais uniquement si cette action ne présente aucun danger.
3. **Éviter les étincelles :** ne mettre aucun interrupteur électrique sous tension ou hors tension. Ne pas utiliser de téléphone mobile à proximité de la fuite. Ne pas utiliser de flamme nue ni de briquet.
4. **Évacuer la zone :** éloigner toutes les personnes à une distance sûre.
5. **Ventiler immédiatement :** ouvrir toutes les portes et tous les événements de toiture afin que l'hydrogène puisse se disperser dans l'air.
6. **Demander de l'aide :** prévenir le responsable ou appeler les services d'urgence si nécessaire.

Rappel : l'hydrogène monte vers la toiture ; l'ouverture des événements situés en hauteur est donc très importante. Une intervention rapide et correcte peut empêcher qu'une petite fuite ne devienne un accident grave.

Exemples illustratifs

1. **Entrepôt frigorifique solaire-hydrogène — Nord du Nigeria.** Une unité de stockage de tomates utilise de l'énergie issue de l'hydrogène.
 - **Risques :** fuite d'hydrogène près de la zone de produits ; une mauvaise ventilation emprisonne le gaz sous la toiture.
 - **Mesures de sécurité :** installer des événements ou des ventilateurs en toiture ; poser des panneaux « Interdiction de fumer » et « Hydrogène en service » ; effectuer chaque jour une recherche de fuites à l'eau savonneuse.
 - **Pourquoi est-ce essentiel ?** Une fuite pourrait s'enflammer et détruire les produits comme l'installation.
 - **Enseignement :** une bonne ventilation et des recherches régulières de fuites peuvent prévenir des accidents graves.
2. **Tour de télécommunication — Zone rurale du Ghana.** Une entreprise de télécommunication en zone rurale au Ghana a remplacé d'anciens groupes électrogènes diesel par des piles à combustible à hydrogène.
 - **Situation :** l'entreprise a commencé à utiliser de l'hydrogène, mais les anciennes conduites du système diesel étaient toujours en place.
 - **Nouveaux risques :**
 - Fuites d'hydrogène invisibles ;
 - Fragilisation des anciennes conduites par l'hydrogène.
 - **Mesures prises par les techniciens :**
 - Ils ont remplacé les anciennes conduites par des matériaux compatibles avec l'hydrogène ;

- Ils ont commencé à rechercher les fuites aux points hauts, dans la zone de la toiture ;
- Ils ont assuré une bonne circulation de l'air autour des équipements.
- **Enseignement** : lorsque vous adoptez une nouvelle technologie telle que l'hydrogène, vous devez également adapter vos pratiques de sécurité.

Activités en classe et réflexion

1. Question de discussion : dans un atelier rural sans électricité, quelle méthode de détection des fuites est la plus adaptée ? Pourquoi ?

2. Mise en situation : que devez-vous faire en premier si vous entendez un sifflement près d'une bouteille d'hydrogène ?

Invitez les apprenants à réfléchir avant de répondre.

5.5. Liste de contrôle quotidienne de sécurité (préparation au niveau pratique)

Les apprenants doivent s'habituer à suivre cette liste de contrôle :

1. Vérifier tous les assemblages à l'aide d'une solution savonneuse ;
2. Inspecter les conduites à la recherche de fissures ou de dommages ;
3. Vérifier que les systèmes de ventilation fonctionnent ;
4. Confirmer que la signalisation de sécurité et les EPI sont disponibles ;
5. Vérifier que les issues sont dégagées.

5.6. Résumé du chapitre

L'hydrogène est un gaz invisible et inodore qui peut s'enflammer très facilement, ce qui présente un danger. Une fuite est difficile à remarquer sans instrument ; des méthodes simples, comme l'emploi d'une solution savonneuse, peuvent aider à la repérer grâce à la formation de bulles. L'hydrogène étant très léger, il monte ; une bonne ventilation en partie haute est donc importante pour éviter son accumulation. En situation d'urgence, les personnes doivent agir rapidement tout en restant calmes et suivre les procédures de sécurité. En outre, certains matériaux anciens peuvent se fragiliser lorsqu'ils sont exposés à l'hydrogène et risquent alors de se rompre. Le respect des règles et précautions de sécurité adéquates permet de prévenir la plupart des accidents impliquant de l'hydrogène.

Questions de révision de fin de chapitre

Questions à choix multiple

1. Les flammes d'hydrogène sont :
 - A. Jaune vif ;
 - B. Bleues et visibles ;
 - C. Presque invisibles en plein jour ;
 - D. Vertes.
2. L'hydrogène gazeux s'accumule généralement :
 - A. Près du sol ;
 - B. Dans l'eau ;
 - C. Près de la toiture ;
 - D. Uniquement à l'intérieur des conduites.
3. Une méthode sûre de détection des fuites est :

- A. L'utilisation d'un briquet ;
- B. La détection à l'odeur ;
- C. L'emploi d'une solution savonneuse ;
- D. Le contact avec la conduite.

Réponses courtes

- 4. Pourquoi la ventilation est-elle importante ?
- 5. Qu'est-ce que la fragilisation par l'hydrogène ?

Mise en situation pratique

- 6. Rédigez une liste de contrôle quotidienne en quatre étapes pour un système à hydrogène.

H2-B3 : PRINCIPES FONDAMENTAUX DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

À la fin de ce chapitre, les apprenants seront capables de :

- Identifier les principales méthodes de production d'hydrogène (SMR, électrolyse, biomasse et gazéification du charbon) ;
- Distinguer les types d'hydrogène selon leur couleur (gris, bleu, vert et brun) ;
- Expliquer les principaux facteurs de rendement et de coût ;
- Choisir la méthode de production la mieux adaptée à un village rural d'Afrique de l'Ouest en fonction des ressources disponibles.

CHAPITRE 1

PRINCIPALES MÉTHODES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE (H2-B3-1)

1.1. Introduction : pourquoi l'hydrogène est-il important ?

L'hydrogène est un vecteur énergétique propre. Cela signifie qu'il peut stocker et transporter de l'énergie afin qu'elle soit utilisée ultérieurement pour produire de l'électricité, de la chaleur ou du carburant destiné à des machines et à des véhicules.

L'hydrogène est très important, car il peut remplacer le gazole et d'autres combustibles fossiles que nous utilisons quotidiennement. Il peut aussi stocker l'énergie produite par les panneaux solaires et les éoliennes afin de l'utiliser lorsque le soleil ne brille pas ou que le vent ne souffle pas. Lorsque l'hydrogène est utilisé, il ne produit ni fumée ni gaz nocifs ; seule de l'eau propre est rejetée.

En Afrique, et plus particulièrement dans des pays d'Afrique de l'Ouest comme le Sénégal, le Nigeria, le Ghana et la Côte d'Ivoire, l'hydrogène peut apporter des avantages considérables. Il peut fournir une alimentation électrique fiable à des villages isolés dépourvus d'électricité. Il peut contribuer à réduire les quantités de combustibles coûteux que nous importons d'autres pays. Surtout, nous pouvons produire de l'hydrogène à partir de nos propres ressources locales, telles qu'un fort ensoleillement et les déchets agricoles (biomasse).

1.2. Principales méthodes de production d'hydrogène (H2-B3-1)

Il existe quatre grandes méthodes de production de l'hydrogène. Chacune utilise des matières premières différentes et présente des coûts et des effets environnementaux distincts. Examinons-les l'une après l'autre.

1.2.1. Vaporeformage du méthane (SMR)

Le vaporeformage du méthane (SMR, *Steam Methane Reforming*) est aujourd'hui la méthode la plus utilisée dans le monde. Dans ce procédé, le gaz naturel est mélangé à de la vapeur à très haute température afin de produire de l'hydrogène.

Entrées : gaz naturel + eau (sous forme de vapeur)

Produits : hydrogène (H₂) + dioxyde de carbone (CO₂)

- **Rendement :** 60-75 %
- **Coût :** environ 1-2 USD par kg

Avantages :

- Il s'agit aujourd'hui de la méthode la moins coûteuse de production d'hydrogène ;
- Elle est déjà utilisée dans de nombreuses industries.

Inconvénients :

- Elle rejette une grande quantité de dioxyde de carbone (CO₂), qui pollue l'air ;
- Elle nécessite du gaz naturel, qui n'est pas disponible dans tous les pays.

Contexte local : le Nigeria dispose d'importantes réserves de gaz naturel ; le SMR constitue donc actuellement une option réaliste pour une production à grande échelle dans ce pays.

1.2.2. Électrolyse

L'électrolyse utilise de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle revient à utiliser l'électricité pour « séparer » les constituants de l'eau.

Entrées : eau + électricité

Produits : hydrogène + oxygène

- **Rendement :** 55-75 %
- **Coût :** environ 3-6 USD par kg

Avantages :

- Elle est très propre si l'électricité provient de l'énergie solaire ou éolienne ;
- Elle convient très bien aux pays ensoleillés d'Afrique de l'Ouest.

Inconvénients :

- Elle est aujourd'hui plus coûteuse que le SMR ;
- Elle nécessite une source d'électricité fiable.

Contexte local : le Sénégal et le Ghana bénéficient d'un ensoleillement abondant ; l'électrolyse alimentée par l'énergie solaire offre donc un très bon potentiel de production d'hydrogène propre (vert).

1.2.3. Hydrogène issu de la biomasse

Cette méthode utilise des déchets organiques provenant des exploitations agricoles et des ménages pour produire de l'hydrogène.

Entrées : résidus de culture tels que les balles de riz, les pelures de manioc et les résidus de palmier

Produits : hydrogène + faible quantité d'émissions

- **Rendement :** 40-50 %
- **Coût :** environ 2-4 USD par kg

Avantages :

- Elle utilise des déchets qui sont habituellement jetés ;
- Elle convient aux zones rurales et agricoles.

Inconvénients :

- Son rendement est inférieur à celui des autres méthodes ;
- Elle nécessite une bonne organisation afin de collecter régulièrement les déchets.

Contexte local : la Côte d'Ivoire, le Bénin et certaines régions du Ghana produisent de grandes quantités de déchets agricoles, ce qui fait de l'hydrogène issu de la biomasse une option prometteuse pour les villages.

2.4. Gazéification du charbon

Dans cette méthode, le charbon est chauffé à très haute température afin de produire de l'hydrogène.

Entrée : charbon

Produits : hydrogène + grande quantité de CO₂

Rendement : 45-55 %

Coût : environ 1-2 USD par kg

Avantage :

- Elle est peu coûteuse là où le charbon est disponible.

Inconvénients :

- Elle produit beaucoup de pollution et de CO₂ ;

- Elle n'est pas adaptée à un avenir énergétique propre.

Contexte local : cette méthode est peu utilisée en Afrique de l'Ouest, car la plupart des pays ne disposent pas d'importants gisements de charbon et privilégient des solutions plus propres.

1.3. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons appris que l'hydrogène peut être produit selon quatre méthodes principales :

- **Vaporeformage du méthane (SMR)** - méthode la moins coûteuse, mais polluante ;
- **Électrolyse** - procédé propre lorsqu'il utilise de l'électricité renouvelable et bien adapté aux régions ensoleillées ;
- **Hydrogène issu de la biomasse** - utilise des déchets agricoles et convient aux zones rurales d'Afrique de l'Ouest ;
- **Gazéification du charbon** - peu coûteuse, mais très polluante.

Chaque méthode présente ses propres avantages, son propre coût et ses propres effets sur l'environnement. Pour l'Afrique de l'Ouest, l'électrolyse alimentée par l'énergie solaire et la production à partir de la biomasse issue des résidus de culture sont les méthodes les plus prometteuses, car elles utilisent des ressources locales et contribuent aux objectifs d'une énergie plus propre. Le choix de la méthode de production appropriée dépend des ressources disponibles localement : ensoleillement, gaz naturel ou déchets agricoles.

CHAPITRE 2

CLASSIFICATION DE L'HYDROGÈNE PAR COULEUR

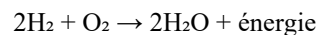
L'hydrogène est souvent classé au moyen de codes couleur fondés sur la méthode de production et l'impact environnemental. Des « couleurs » particulières servent à indiquer dans quelle mesure la production de l'hydrogène est propre ou polluante. Ces couleurs ne correspondent pas à la couleur réelle du gaz. Elles renseignent plutôt sur la quantité de pollution, notamment de dioxyde de carbone, produite lors de la fabrication de l'hydrogène. Il est très important de comprendre ces codes couleur, car ils nous aident à choisir les méthodes de production d'hydrogène les plus propres et les mieux adaptées à nos ressources locales.

L'hydrogène est couramment réparti en trois grandes catégories selon sa méthode de production et son impact sur l'environnement : l'hydrogène vert, l'hydrogène bleu et l'hydrogène gris. La figure 2.1 présente ces classifications et le tableau 2.1 compare les différents types d'hydrogène selon leur méthode de production, leur matière première principale, leur niveau de pollution, leur coût et leur adéquation au contexte ouest-africain. Les procédés de production de chaque type d'hydrogène sont décrits ci-après.

2.1.1. Hydrogène vert

L'hydrogène vert est produit à l'aide de sources d'énergie renouvelables. Il peut être obtenu par électrolyse de l'eau alimentée par l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou l'hydroélectricité.

Procédé :



Avantages :

- Zéro émission de carbone ;
- Source d'énergie durable ;
- Contribution aux objectifs climatiques.

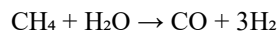
2.1.2. Hydrogène bleu

L'hydrogène bleu est produit à partir de gaz naturel, mais les émissions de dioxyde de carbone sont captées et stockées.

Procédé de production :

- Vaporeformage du méthane (SMR) + captage et stockage du carbone (CCS)

Réaction :



Avantages :

- Émissions inférieures à celles de l'hydrogène gris ;
- Technologie de transition vers un hydrogène propre.

2.1.3. Hydrogène gris

L'hydrogène gris correspond aujourd'hui à la méthode de production d'hydrogène la plus répandue.

- **Procédé de production :** vaporeformage du méthane sans captage du carbone ;
- **Inconvénient :** émissions importantes de CO_2 .

Environ 95 % de la production mondiale d'hydrogène correspond actuellement à de l'hydrogène gris.

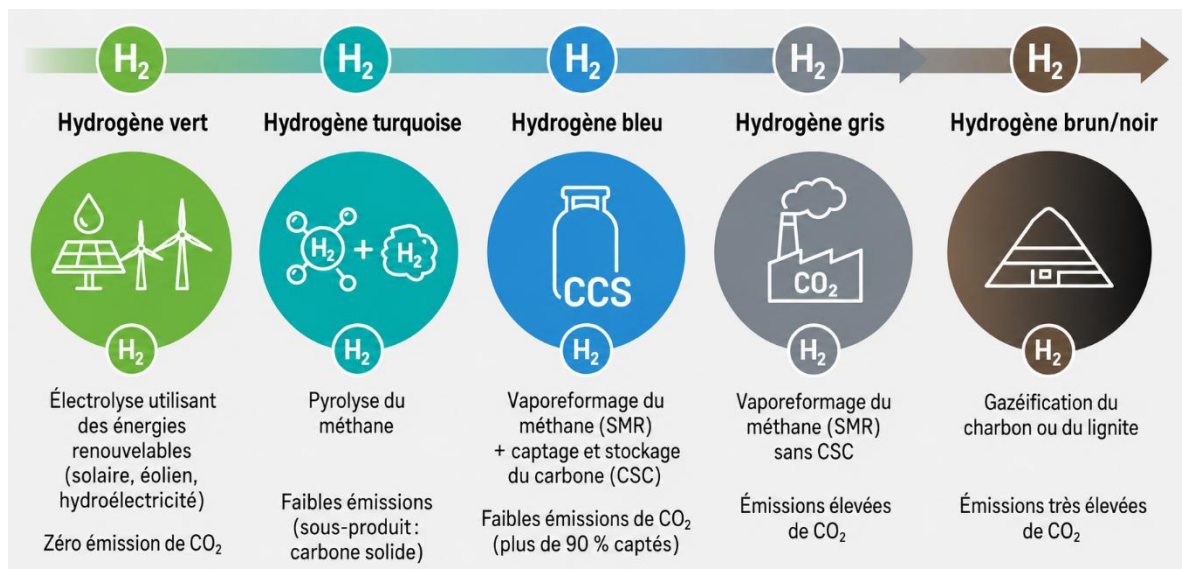


Figure 2.1. Schéma de classification de l'hydrogène par couleur

Légende française des libellés de l'image : Green Hydrogen = hydrogène vert ; Electrolysis using renewable energy (solar, wind, hydro) = électrolyse utilisant une énergie renouvelable (solaire, éolienne ou hydraulique) ; Zero CO₂ emissions = zéro émission de CO₂ ; Turquoise Hydrogen = hydrogène turquoise ; Methane pyrolysis = pyrolyse du méthane ; Low emissions (solid carbon byproduct) = faibles émissions (carbone solide comme coproduit) ; Blue Hydrogen = hydrogène bleu ; Steam Methane Reforming (SMR) + Carbon Capture & Storage (CCS) = vaporeformage du méthane (SMR) + captage et stockage du carbone (CCS) ; Low CO₂ emissions (90%+ captured) = faibles émissions de CO₂ (plus de 90 % captées) ; Grey Hydrogen = hydrogène gris ; Steam Methane Reforming (SMR) without CCS = vaporeformage du méthane (SMR) sans CCS ; High CO₂ emissions = fortes émissions de CO₂ ; Brown/Black Hydrogen = hydrogène brun/noir ; Coal or lignite gasification = gazéification du charbon ou du lignite ; Very high CO₂ emissions = très fortes émissions de CO₂.

Tableau 2.1. Comparaison détaillée des types d'hydrogène, de leur mode de production et de leur niveau de pollution

Type d'hydrogène	Méthode de production	Matière première principale	Niveau de pollution	Adéquation à l'Afrique de l'Ouest
Hydrogène brun/noir	Gazéification du charbon	Charbon	Élevé	Faible
Hydrogène gris	SMR	Gaz naturel	Élevé	Modérée
Hydrogène bleu	SMR avec CCS	Gaz naturel	Moyen	Modérée à élevée
Hydrogène vert	Électrolyse utilisant une énergie renouvelable	Eau	Très faible	Élevée

2.2. Pourquoi les couleurs de l'hydrogène sont-elles importantes en Afrique de l'Ouest ?

En Afrique de l'Ouest, nous bénéficions d'un fort ensoleillement presque toute l'année. L'hydrogène vert est donc très prometteur pour des pays comme le Sénégal, le Ghana et la Côte d'Ivoire.

L'utilisation d'hydrogène vert nous aide à :

- Réduire notre dépendance à l'égard du gazole importé ;
- Fournir aux villages une énergie plus propre ;
- Lutter contre le changement climatique.

L'hydrogène gris et l'hydrogène brun sont peut-être moins coûteux aujourd'hui, mais ils contribuent à la pollution. L'hydrogène bleu constitue une étape intermédiaire, tandis que l'hydrogène vert représente l'objectif à long terme pour l'Afrique. La figure 2.2 présente une échelle simple et verticale des couleurs de l'hydrogène, classées de haut en bas :

- Brun (niveau de pollution le plus élevé) → gris → bleu → vert (zéro pollution).

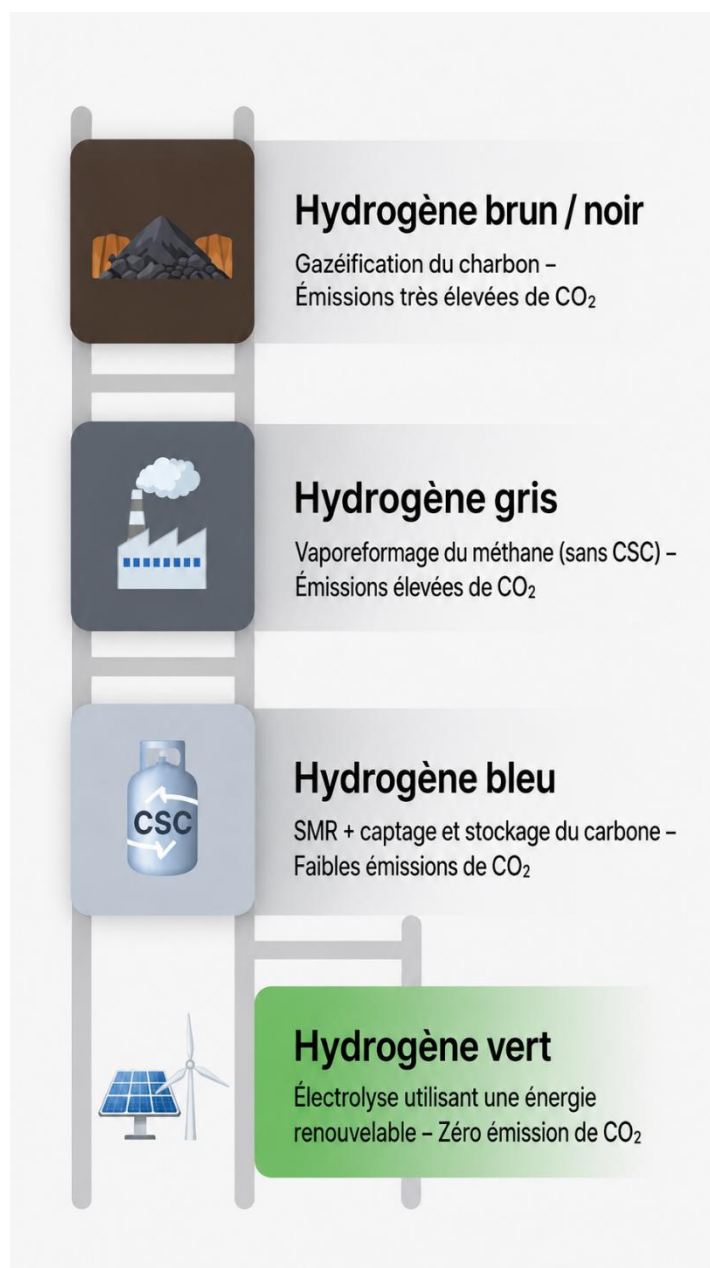


Figure 2.2. Échelle des couleurs de l'hydrogène

Légende française des libellés de l'image : Brown / Black Hydrogen = hydrogène brun/noir ; Coal gasification = gazéification du charbon ; Very high CO₂ emissions = très fortes émissions de CO₂ ; Grey Hydrogen = hydrogène gris ; Steam Methane Reforming (no CCS) = vaporeformage du méthane (sans CCS) ; High CO₂ emissions = fortes émissions de CO₂ ; Blue Hydrogen = hydrogène bleu ; SMR + Carbon Capture & Storage = SMR + captage et stockage du carbone ; Low CO₂ emissions = faibles émissions de CO₂ ; Green Hydrogen = hydrogène vert ; Electrolysis using renewable energy = électrolyse utilisant une énergie renouvelable ; Zero CO₂ emissions = zéro émission de CO₂.

Chaque échelon comporte une petite icône (charbon, gaz, gaz + captage, panneau solaire) et une courte indication sur les émissions. Les apprenants peuvent ainsi visualiser plus facilement l'ordre des filières, de la plus polluante à la plus propre.

En général, les pays dotés d'un fort potentiel d'énergie renouvelable, notamment les pays d'Afrique subsaharienne et d'Afrique de l'Ouest, pourraient devenir des producteurs d'hydrogène vert.

Exemples :

- Régions riches en énergie solaire (Sahel) ;
- Régions côtières riches en énergie éolienne ;
- Régions disposant d'hydroélectricité.

Cette évolution pourrait créer de nouvelles filières énergétiques et de nouveaux emplois.

L'Afrique de l'Ouest bénéficie d'un fort ensoleillement tout au long de l'année, ce qui fait de l'hydrogène vert une solution énergétique particulièrement adaptée. Des pays comme le Mali, le Burkina Faso et le Niger disposent d'un excellent potentiel solaire, qui peut alimenter des électrolyseurs et produire de l'hydrogène. La figure 2.3 montre comment des panneaux solaires installés dans un village ensoleillé d'Afrique de l'Ouest peuvent être raccordés à un électrolyseur pour produire de l'hydrogène, la vapeur d'eau propre constituant le seul coproduit. Les ressources locales en eau, notamment les rivières et les forages, peuvent alimenter ce procédé. L'utilisation de l'hydrogène vert peut réduire la dépendance à l'égard du gazole et améliorer l'autonomie énergétique, tout en répondant aux besoins énergétiques des zones rurales et urbaines.

En outre, la production de biohydrogène offre un potentiel important. Des déchets agricoles, tels que les pelures de manioc et les balles de riz, peuvent être transformés en hydrogène. Cette solution contribue à réduire la pollution de l'environnement tout en créant des possibilités d'emploi dans les communautés locales.

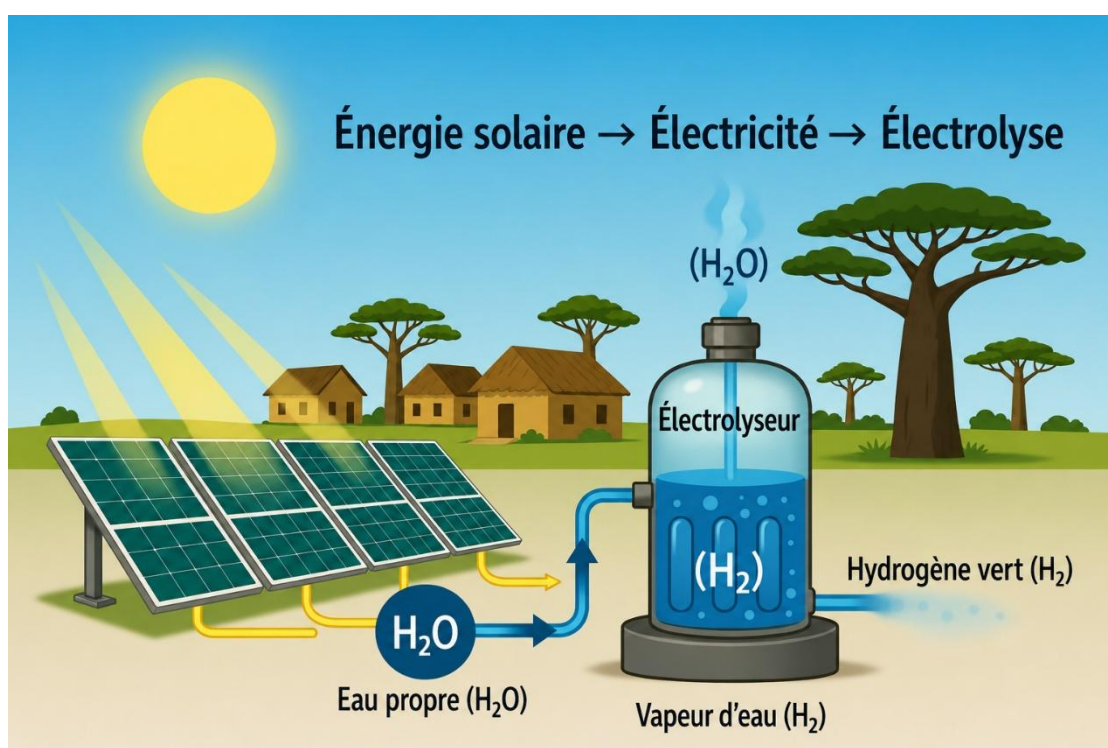


Figure 2.3. Production d'hydrogène vert à partir de la lumière solaire en Afrique de l'Ouest

Légende française des libellés de l'image : Solar Energy → Electricity → Electrolysis = énergie solaire → électricité → électrolyse ; Clean water (H_2O) = eau propre (H_2O) ; Electrolyser = électrolyseur ; Water vapor (H_2) = vapeur d'eau (H_2) [libellé de la source à valider] ; Green Hydrogen (H_2) = hydrogène vert (H_2).

2.3. Résumé du chapitre

L'hydrogène est souvent classé par couleur afin d'indiquer le caractère plus ou moins respectueux de l'environnement de sa production. L'hydrogène gris est l'option la plus abordable, mais aussi la plus polluante, tandis que l'hydrogène bleu offre une solution plus propre grâce au captage du dioxyde de carbone produit lors de sa fabrication. L'hydrogène vert est considéré comme la forme la plus propre, car il est produit à l'aide de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie

solaire et l'énergie éolienne. À l'inverse, l'hydrogène brun est le plus nocif pour l'environnement, puisqu'il est produit à partir de charbon. Pour l'Afrique de l'Ouest, l'hydrogène vert représente la solution d'avenir la plus prometteuse en raison de l'ensoleillement abondant de la région et de la disponibilité des ressources constituées par les déchets agricoles.

Questions de révision de fin de chapitre

I. Questions à choix multiple

1. Quel type d'hydrogène est le plus propre ?
 - A. Hydrogène gris
 - B. Hydrogène bleu
 - C. Hydrogène vert
 - D. Hydrogène brun
2. L'hydrogène gris est principalement produit à partir :
 - A. Du charbon
 - B. De l'énergie solaire
 - C. Du gaz naturel
 - D. Des déchets agricoles
3. Pourquoi l'hydrogène vert convient-il particulièrement bien au Sénégal et au Ghana ?
 - A. Parce que ces pays disposent de grandes quantités de charbon
 - B. Parce qu'ils bénéficient d'un fort ensoleillement pour produire de l'énergie solaire
 - C. Parce qu'ils ne bénéficient d'aucun ensoleillement
 - D. Parce qu'il s'agit de l'option la plus coûteuse

II. Questions à réponse courte

4. Expliquez en une ou deux phrases la différence entre l'hydrogène gris et l'hydrogène bleu.
5. Pourquoi dit-on que l'hydrogène vert constitue la meilleure solution pour l'avenir de l'Afrique de l'Ouest ?

III. Question pratique

6. Un village du nord du Nigeria souhaite produire de l'hydrogène. Il bénéficie d'un fort ensoleillement, mais dispose de moyens financiers limités. Quelle couleur d'hydrogène recommanderiez-vous et pourquoi ? Répondez en 3 à 4 phrases.

CHAPITRE 3

NOTIONS TECHNICO-ÉCONOMIQUES FONDAMENTALES (H2-B3-3)

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

À la fin de ce chapitre, vous serez capables de :

- Définir en termes simples le « coût actualisé de l'hydrogène » (LCOH) ;
- Énumérer les trois principaux facteurs de coût de toute méthode de production d'hydrogène ;
- Comparer les dépenses d'investissement (CAPEX) et les dépenses d'exploitation (OPEX) relatives de l'hydrogène gris et de l'hydrogène vert ;
- Identifier la méthode de production la moins coûteuse aujourd'hui et celle qui devrait être la moins coûteuse d'ici 2030.

3.1. Pourquoi les aspects économiques sont-ils importants pour les techniciens ?

En tant que technicien ou apprenti de l'enseignement et de la formation techniques et professionnels (EFTP) travaillant dans une installation de production d'hydrogène, vous effectuez chaque jour des tâches pratiques : vous manœuvrez des vannes, contrôlez des pressions, entretenez des électrolyseurs ou dépannez des reformeurs. Pourtant, les aspects économiques déterminent si l'installation sera construite et pendant combien de temps elle restera en service. Prenons l'exemple d'une petite entreprise de livraison. Vous pouvez acheter le meilleur camion possible - la technologie -, mais si le carburant coûte davantage que ce que les clients paient pour les livraisons, l'entreprise échoue. Dans la production d'hydrogène, le « carburant » correspond aux intrants, à savoir le gaz naturel ou l'électricité, et la « livraison » correspond aux kilogrammes de H₂ que vous vendez.

Chaque méthode de production nécessite des intrants coûteux et fournit un produit, le H₂, qui doit être vendu avec une marge bénéficiaire. Si vos travaux de maintenance réduisent les temps d'arrêt ou améliorent le rendement, vous diminuez directement le coût par kilogramme d'hydrogène. Les techniciens doivent donc comprendre les coûts fondamentaux, non pas pour devenir comptables, mais pour prendre de meilleures décisions sur le terrain.

L'hydrogène gris, produit à partir de combustibles fossiles, est aujourd'hui peu coûteux, mais génère du CO₂. L'hydrogène vert, produit à partir d'électricité renouvelable, coûte actuellement plus cher, mais ne génère aucune émission. Comprendre ces différences vous aide à expliquer à votre équipe pourquoi une installation pourrait changer de technologie à l'avenir.

Questions de réflexion :

1. Dans vos propres termes, pourquoi un technicien devrait-il s'intéresser au coût de production de l'hydrogène ?
2. Donnez une analogie concrète, semblable à celle du camion de livraison, qui explique pourquoi le coût des intrants est important.

3.2. Les trois piliers du coût de l'hydrogène : CAPEX, OPEX et facteur de charge

Chaque méthode de production d'hydrogène repose sur trois piliers simples. Apprenez-les une fois et vous pourrez comparer toutes les technologies.

- 1. CAPEX (dépenses d'investissement)** - coût initial de construction de l'installation et d'achat des équipements.
Analogie : l'achat du camion de livraison. Des CAPEX élevés signifient que les électrolyseurs ou les reformeurs sont coûteux.
- 2. OPEX (dépenses d'exploitation)** - coûts de fonctionnement quotidiens, tels que la maintenance, la main-d'œuvre, l'eau et les catalyseurs. Analogie : le salaire du conducteur et l'entretien du camion.

3. Facteur de charge - pourcentage du temps pendant lequel l'installation fonctionne à pleine puissance. Analogie : nombre d'heures par an pendant lesquelles le camion roule réellement au lieu de rester à l'arrêt. Une installation qui fonctionne 90 % du temps répartit ses CAPEX sur un nombre de kilogrammes de H₂ beaucoup plus élevé qu'une installation qui ne fonctionne que 30 % du temps.

Ces trois piliers déterminent ensemble le coût final par kilogramme. Les installations utilisant des combustibles fossiles ont généralement des CAPEX plus faibles, mais des coûts de matières premières plus élevés. Les installations d'électrolyse présentent des CAPEX plus élevés, mais peuvent exploiter le soleil ou le vent « gratuits » lorsque le soleil brille ou que le vent souffle.

Questions de réflexion :

1. Nommez les trois piliers du coût de l'hydrogène.
2. Quel pilier correspond au « nombre d'heures pendant lesquelles le camion roule réellement » ?

3.3. Formule simplifiée du LCOH

Le coût actualisé de l'hydrogène (LCOH, *Levelized Cost of Hydrogen*) correspond simplement au coût net moyen de production d'un kilogramme de H₂ sur l'ensemble de la durée de vie de l'installation. Il répond à la question suivante : « Si j'additionne chaque dollar dépensé et que je divise le résultat par chaque kilogramme produit, quel est le coût réel par kilogramme ? »

Aucun calcul différentiel n'est nécessaire. La formule en langage courant est la suivante :

$$\text{LCOH} = \text{Coût total sur la durée de vie (USD)} / \text{Production totale de H}_2 \text{ sur la durée de vie (kg)}$$

En termes courants :

- Additionnez l'ensemble des CAPEX, répartis sur plusieurs années, l'ensemble des OPEX et tous les coûts de matière première ou d'électricité ;
- Divisez le résultat par le nombre total de kilogrammes d'hydrogène que l'installation produira pendant sa durée de vie de 20 à 30 ans.

Ce nombre permet de comparer sur une même base le SMR, l'électrolyse et la gazéification du charbon.

Décomposition des coûts de l'hydrogène gris (SMR)

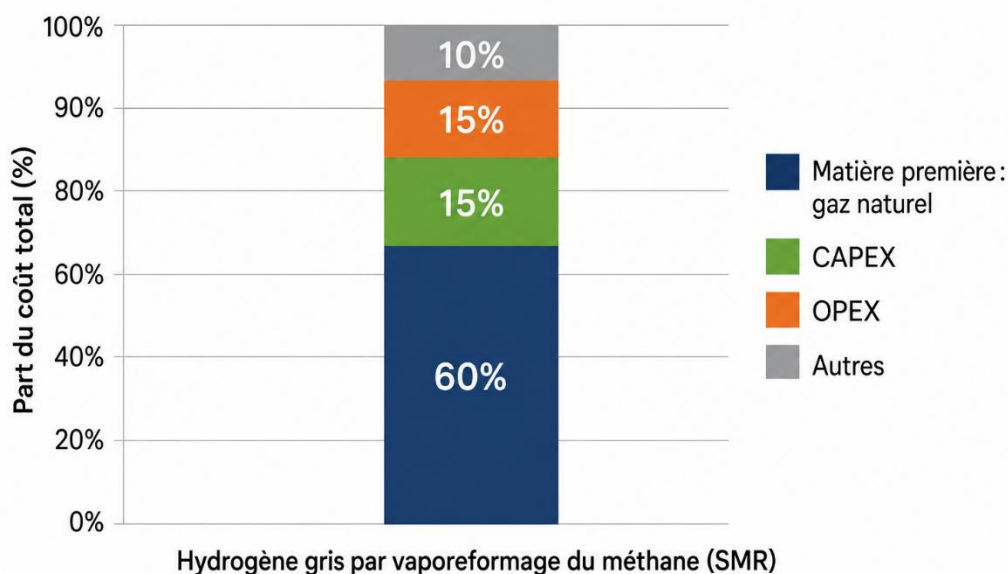


Figure 3.1. Répartition des coûts de l'hydrogène gris (SMR)

Légende française des libellés de l'image : Cost Breakdown of Grey Hydrogen (SMR) = répartition des coûts de l'hydrogène gris (SMR) ; Share of Total Cost (%) = part du coût total (%) ; Natural Gas Feedstock = gaz naturel utilisé comme matière première ; CAPEX = dépenses d'investissement ; OPEX = dépenses d'exploitation ; Other = autres ; Grey Hydrogen via Steam Methane Reforming (SMR) = hydrogène gris produit par vaporeformage du méthane (SMR).

Le tableau 3.1 compare les plages de coûts 2025-2026, exprimées en USD par kilogramme de H₂, de l'hydrogène gris, de l'hydrogène bleu et de l'hydrogène vert pour les principales méthodes commerciales. Les autres méthodes sont brièvement mentionnées.

Tableau 3.1. Comparaison des coûts de l'hydrogène gris, bleu et vert en 2025-2026

Méthode de production	Type	Coût 2025/2026 (USD/kg)	Principal facteur de coût	Remarques principales
Vaporeformage du méthane (sans CCS)	Gris	1,5-2,5	Gaz naturel (60 %)	Option la moins coûteuse aujourd'hui ; fortes émissions de CO ₂
SMR + captage et stockage du carbone	Bleu	2,0-3,5	Gaz naturel + CCS	Émissions réduites ; coût supplémentaire du captage
Électrolyse alcaline / PEM	Vert	4,0-8,0	Électricité (70 %)	Zéro émission si l'électricité est renouvelable
Gazéification du charbon	Fossile (gris/noir)	2,0-4,0	Charbon utilisé comme matière première	Courante en Asie ; très fortes émissions de CO ₂
Gazéification de la biomasse	Émergente / renouvelable	3,0-6,0	Biomasse utilisée comme matière première	Renouvelable, mais disponibilité variable
Électrolyse à oxyde solide (SOEC)	Vert (avancée)	3,5-7,0	Électricité + chaleur	Rendement supérieur ; nécessite une température élevée
Décomposition thermochimique de l'eau	Émergente	Pas encore commercialisée	Chaleur à haute température	Stade de la recherche ; faible coût potentiel à terme

Option la moins coûteuse aujourd'hui : SMR gris.

Option qui devrait être la moins coûteuse d'ici 2030 : électrolyse verte dans les régions où l'électricité renouvelable est très bon marché, avec une projection de 1 à 3 USD/kg.

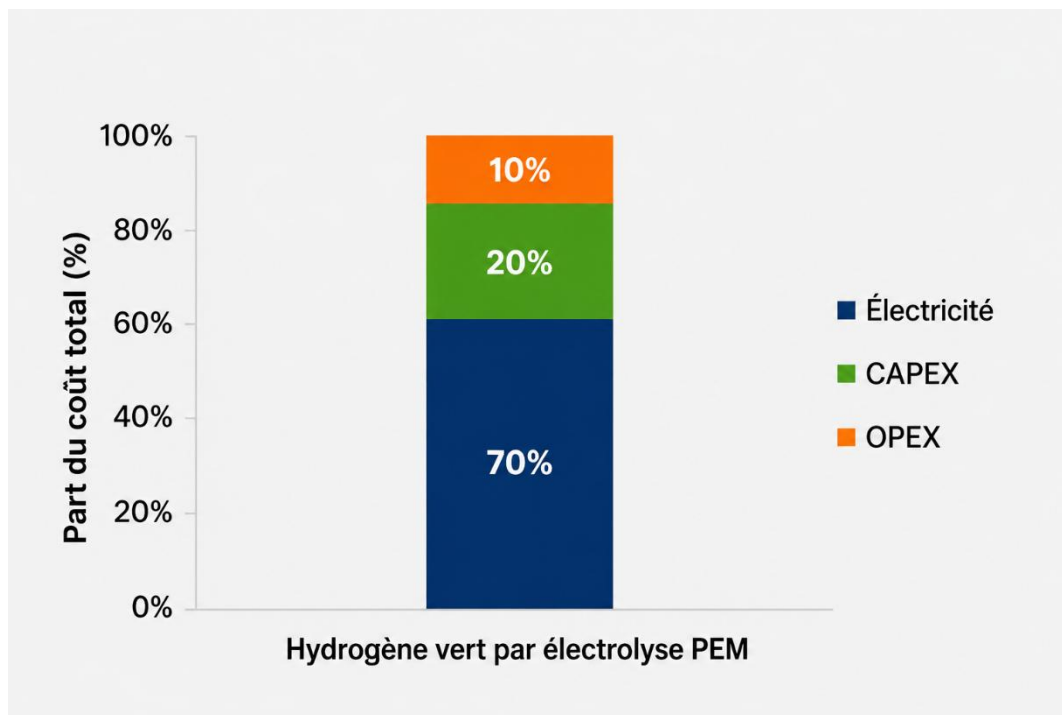


Figure 3.2. Répartition des coûts de l'hydrogène vert produit par électrolyse PEM

Légende française des libellés de l'image : Share of Total Cost (%) = part du coût total (%) ; Electricity = électricité ; CAPEX = dépenses d'investissement ; OPEX = dépenses d'exploitation ; Green Hydrogen via PEM Electrolysis = hydrogène vert produit par électrolyse PEM.

3.4. Influence des variables clés : prix de l'électricité et prix du gaz naturel

Le prix de l'électricité est le facteur décisif pour l'hydrogène vert. Chaque dollar supplémentaire par MWh ajoute environ 0,05 à 0,07 USD au coût de chaque kilogramme de H₂. Le prix du gaz naturel domine le coût de l'hydrogène gris et de l'hydrogène bleu. Une forte hausse du prix du gaz, par exemple de 3 à 8 USD par MMBtu, peut rendre le SMR plus coûteux que l'électrolyse dans certains pays.

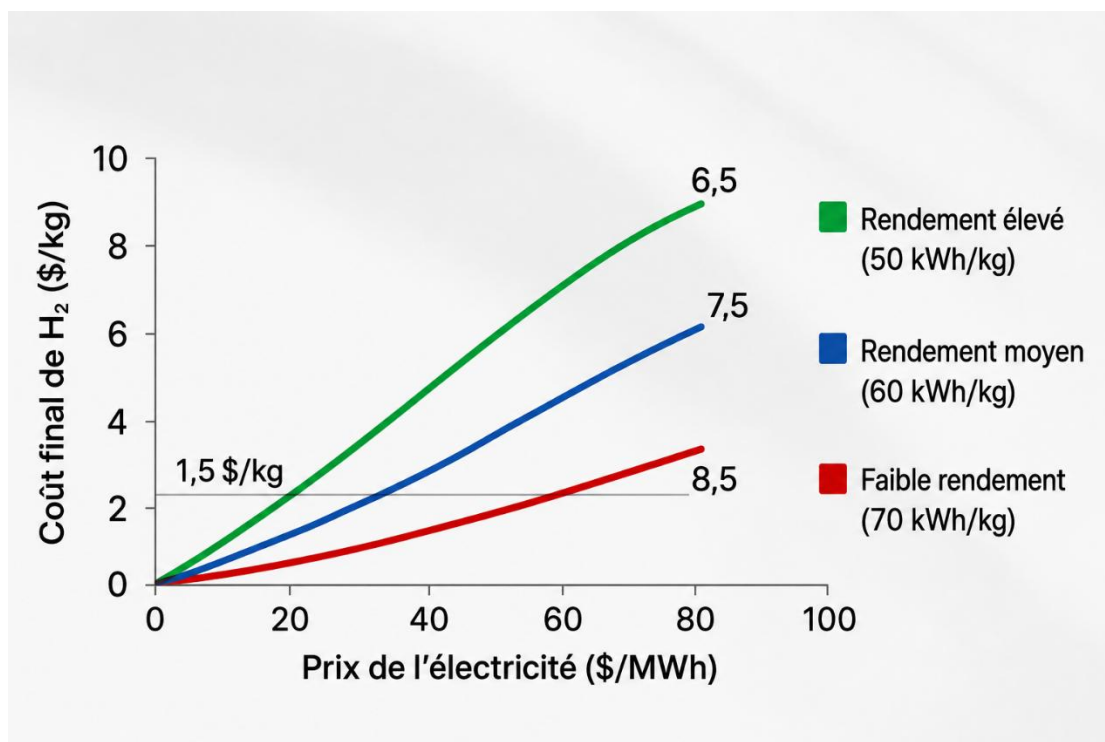


Figure 3.3. Influence du prix de l'électricité sur le coût de l'hydrogène vert

Légende française des libellés de l'image : Final H₂ Cost (USD/kg) = coût final du H₂ (USD/kg) ; Electricity Price (USD/MWh) = prix de l'électricité (USD/MWh) ; High Efficiency (50 kWh/kg) = rendement élevé (50 kWh/kg) ; Medium Efficiency (60 kWh/kg) = rendement moyen (60 kWh/kg) ; Low Efficiency (70 kWh/kg) = rendement faible (70 kWh/kg) ; 1.5 USD/kg = 1,5 USD/kg ; 6.5 = 6,5 ; 7.5 = 7,5 ; 8.5 = 8,5.

3.5. Économies d'échelle : pourquoi une grande installation produit-elle à moindre coût par kilogramme ?

Un électrolyseur de 1 MW revient plus cher par kilogramme qu'une installation de 100 MW. Pourquoi ? De nombreux coûts, notamment les systèmes de commande, les travaux de génie civil et l'ingénierie, sont « fixes » : ils n'augmentent pas proportionnellement à la taille. La répartition de ces coûts fixes sur une quantité d'hydrogène cent fois plus élevée réduit le coût de chaque kilogramme.

Exemple : doubler la taille de l'installation peut n'augmenter les CAPEX que de 70 %, et non de 100 %. C'est pourquoi les gouvernements et les entreprises planifient aujourd'hui des pôles hydrogène d'une puissance de l'ordre du gigawatt plutôt que de petites installations de démonstration.

Questions de réflexion :

1. Si l'électricité coûte 30 USD/MWh au lieu de 70 USD/MWh, l'hydrogène vert deviendra-t-il moins cher ou plus cher ?
2. Vrai ou faux : une grande installation présente toujours un coût par kilogramme inférieur grâce aux économies d'échelle.

3.6. Avantages régionaux

La technologie « gagnante » dépend des ressources disponibles en abondance dans le pays :

- **Moyen-Orient et Afrique du Nord** → l'énergie solaire + l'électrolyse l'emportent, grâce à une électricité solaire très bon marché ;
- **Côte du golfe des États-Unis et certaines régions de Russie** → le gaz naturel + le SMR, avec ou sans CCS, l'emportent grâce à une matière première bon marché ;
- **Scandinavie, Royaume-Uni et Écosse** → l'énergie éolienne + l'électrolyse l'emportent grâce à un fort potentiel éolien en mer ;
- **Afrique de l'Est et Éthiopie** → l'immense potentiel solaire et hydroélectrique rend l'électrolyse verte très attrayante pour la prochaine décennie.

Les pays qui disposent à la fois d'énergies renouvelables peu coûteuses et de ports adaptés peuvent exporter de l'hydrogène vert ou de l'ammoniac et créer des milliers d'emplois de techniciens.

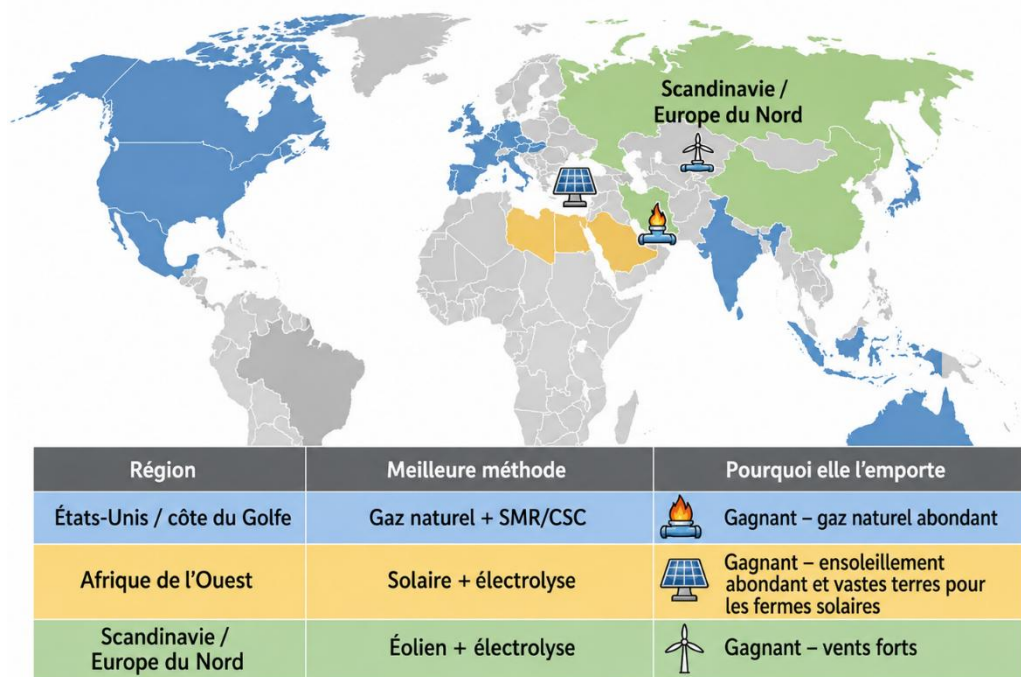


Figure 3.4. Régions les mieux placées pour la production d'hydrogène

Légende française des libellés de l'image : Scandinavia/Northern Europe = Scandinavie/Europe du Nord ; Region = région ; Best Method = meilleure méthode ; Why It Wins = raison de son avantage ; USA/Gulf Coast = États-Unis/côte du golfe ; Natural Gas + SMR/CCS = gaz naturel + SMR/CCS ; Wins - abundant NG = avantage : gaz naturel abondant ; West Africa = Afrique de l'Ouest ; Solar + Electrolysis = énergie solaire + électrolyse ; Wins - abundant sunshine & vast land for solar farms = avantage : ensoleillement abondant et vastes surfaces disponibles pour les centrales solaires ; Wind + Electrolysis = énergie éolienne + électrolyse ; Wins - strong wind = avantage : vent fort.

Activité :

Activité pratique en classe (30 à 45 minutes)

On suppose que l'électricité coûte 0,05 USD/kWh, soit 50 USD/MWh, et qu'un électrolyseur PEM présente un rendement de 65 %, soit environ 60,6 kWh par kg de H₂ :

1. Calculez la composante « électricité » du coût par kilogramme de H₂.
2. Ajoutez 1,5 USD/kg pour les CAPEX + OPEX, soit les coûts fixes habituels.
3. Quel est le LCOH total estimé ?
4. Recommencez le calcul si le prix de l'électricité tombe à 0,02 USD/kWh, valeur courante dans les régions ensoleillées d'ici 2030.

Discutez en groupe : cette installation serait-elle compétitive par rapport à l'hydrogène gris à 2 USD/kg ?

3.7. Résumé du chapitre

Le coût actualisé de l'hydrogène (LCOH) représente le coût moyen de production de l'hydrogène sur toute la durée de vie de l'installation, exprimé par kilogramme. Ce coût dépend de trois facteurs principaux : les dépenses d'investissement (CAPEX), les dépenses d'exploitation (OPEX) et le facteur de charge, qui traduit le degré d'utilisation des actifs de production. Actuellement, l'hydrogène gris produit par vaporeformage du méthane (SMR) est l'option la moins coûteuse, avec un coût d'environ 1,5 à 2,5 USD par kilogramme. L'hydrogène vert produit par électrolyse est toutefois plus coûteux à l'heure actuelle, mais il devrait devenir compétitif, voire constituer l'option la moins coûteuse, d'ici 2030 dans les régions dotées d'importantes ressources énergétiques renouvelables. Le prix de l'électricité est le principal facteur qui influe sur le

coût de l'hydrogène vert, tandis que le prix du gaz naturel détermine principalement le coût de l'hydrogène gris et de l'hydrogène bleu. Enfin, la construction d'installations de plus grande taille et l'exploitation de ressources régionales favorables, telles qu'un ensoleillement abondant, des vents forts ou du gaz naturel peu coûteux, peuvent réduire considérablement les coûts globaux.

Questions de révision

1. Que signifie l'acronyme LCOH et que calcule la formule simplifiée ? Réponse courte.
2. Lequel des éléments suivants ne fait PAS partie des trois principaux piliers du coût ? a) CAPEX ; b) prix de l'électricité ; c) OPEX ; d) facteur de charge.
3. Dans la répartition du coût de l'hydrogène vert, quelle est généralement la composante individuelle la plus importante ?
4. Vrai ou faux : une installation d'électrolyse de 100 MW présentera un coût par kilogramme inférieur à celui d'une installation de 1 MW grâce aux économies d'échelle.
5. Quelle est la méthode de production la moins coûteuse aujourd'hui et laquelle devrait connaître la plus forte amélioration d'ici 2030 ?

Réponses : 1. Coût actualisé de l'hydrogène - coûts totaux sur la durée de vie divisés par le nombre total de kilogrammes produits ; 2. b ; 3. l'électricité ; 4. vrai ; 5. le SMR gris aujourd'hui, puis l'électrolyse verte d'ici 2030 dans les régions riches en ressources renouvelables.

CHAPITRE 4

H2-B3-4 : APERÇU DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

À la fin de ce chapitre, vous serez capables de :

- Nommer trois méthodes émergentes de production d'hydrogène qui ne dépendent ni de combustibles fossiles ni d'eau douce ;
- Expliquer le principal avantage de la pyrolyse du méthane par rapport au vaporeformage du méthane : absence d'émissions de CO₂ et formation de carbone solide comme coproduit ;
- Expliquer pourquoi les cycles thermochimiques nécessitent de très hautes températures, supérieures à 800 °C, et quelles sources d'énergie peuvent fournir cette chaleur ;
- Identifier au moins une limite actuelle, par exemple un faible rendement, une courte durée de vie ou un coût élevé, pour chaque technologie émergente ;
- Indiquer quelle technologie émergente est la plus proche du déploiement commercial : électrolyse AEM ou pyrolyse du méthane.

4.1. Qu'est-ce qui caractérise une technologie « émergente » ?

Toutes les idées nouvelles ne sont pas prêtes à être mises en œuvre dans votre atelier dès demain. Les ingénieurs utilisent une échelle simple appelée niveau de maturité technologique (TRL, *Technology Readiness Level*) pour mesurer dans quelle mesure une idée est proche d'une utilisation réelle.

On peut comparer le TRL à la préparation d'une nouvelle recette :

- **TRL 1-3** : vous lisez la recette et la testez une fois dans votre cuisine, à l'échelle du laboratoire ;
- **TRL 4-6** : vous la préparez dans la cuisine d'un petit restaurant et invitez des amis à la goûter, dans des installations pilotes ;
- **TRL 7-9** : vous ouvrez une grande cantine qui sert 10 000 repas par jour sans erreur, à l'échelle commerciale.

La plupart des technologies « émergentes » se situent entre les TRL 3 et 7. Elles semblent très prometteuses sur le papier ou lors d'essais à petite échelle, mais ne sont pas encore moins coûteuses, plus fiables ou plus faciles à exploiter que les filières de l'hydrogène gris ou vert. Elles sont importantes pour l'avenir à long terme, car elles peuvent utiliser directement des déchets, de l'eau de mer ou la lumière solaire et produire des émissions presque nulles.

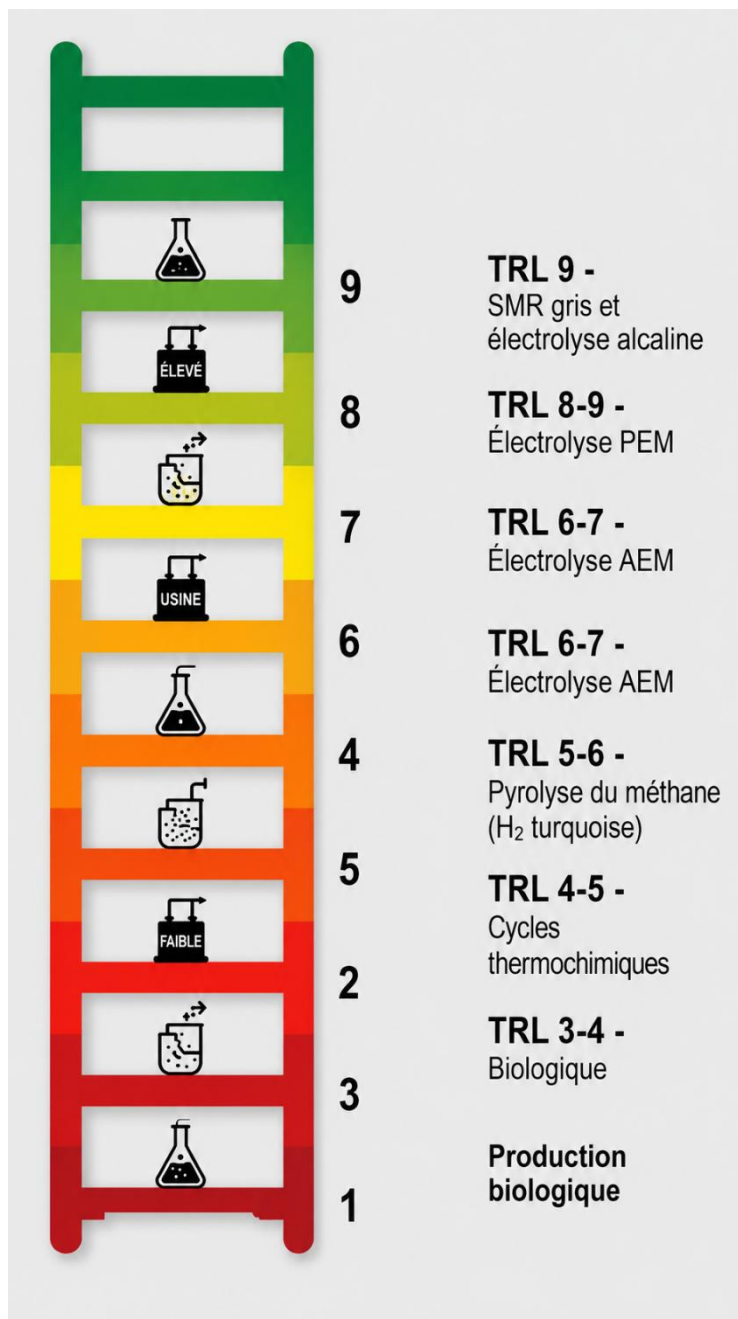


Figure 4.1. Échelle des niveaux de maturité technologique (TRL) pour la production de H₂

Légende française des libellés de l'image : TRL 9 - Grey SM& Alkaline Electrolysis = TRL 9 - SMR gris et électrolyse alcaline [libellé « SM& » dans la source] ; TRL 8-9 PEM Electrolysis = TRL 8-9 - électrolyse PEM ; TRL 6-7 AEM Electrolysis = TRL 6-7 - électrolyse AEM ; TRL 5-6 Methane Pyrolysis (Turquoise H₂) = TRL 5-6 - pyrolyse du méthane (H₂ turquoise) ; TRL 4-5 Thermochemical Cycles = TRL 4-5 - cycles thermochimiques ; TRL 3-4 Biological = TRL 3-4 - voies biologiques ; Biological Production = production biologique ; HIGH = élevé ; LOW = faible.

4.2. Pyrolyse du méthane/H₂ produit par plasma (hydrogène turquoise)

Cette méthode chauffe le méthane, CH₄ provenant du gaz naturel, dans une torche à plasma afin de le séparer en hydrogène gazeux et en poudre de carbone solide : pas d'oxygène, pas de cheminée rejetant du CO₂. Son principal avantage par rapport au vaporeformage classique du méthane (SMR) est le suivant : au lieu d'un gaz à effet de serre, on obtient du carbone solide valorisable, qui peut être vendu pour fabriquer des pneumatiques, des batteries ou des matériaux de construction. Le procédé utilise toujours du gaz naturel comme matière première, mais l'installation peut n'émettre pratiquement aucune émission si le carbone n'est pas brûlé. Plusieurs installations pilotes, aux TRL 5-6, sont en fonctionnement en 2025-2026. Limite

actuelle : les torches à plasma consomment beaucoup d'électricité et le carbone peut s'accumuler à l'intérieur du réacteur, entraînant des arrêts nécessaires au nettoyage.

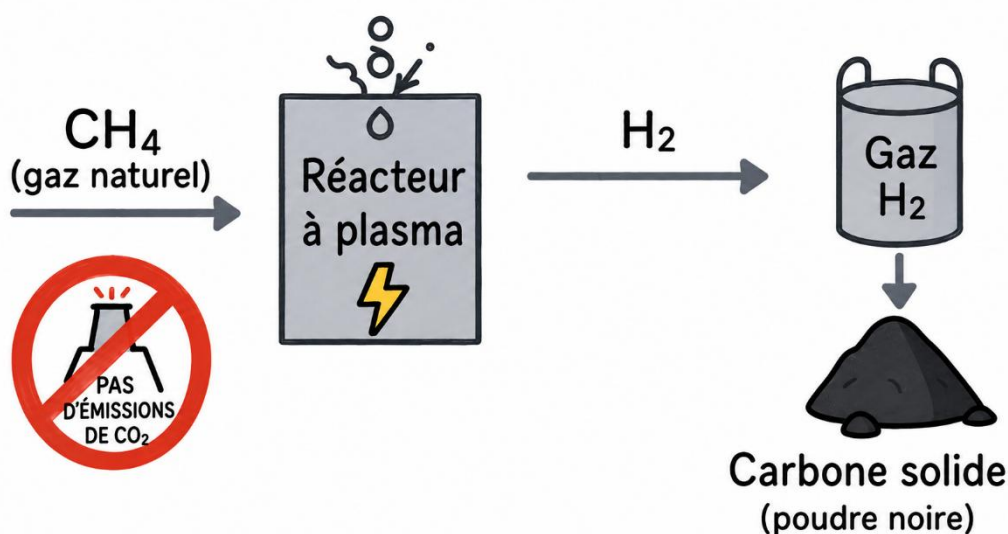


Figure 4.2. Schéma fonctionnel simplifié de la pyrolyse du méthane

Légende française des libellés de l'image : CH₄ (natural gas) = CH₄ (gaz naturel) ; Plasma Reactor = réacteur à plasma ; No CO₂ Emissions = aucune émission de CO₂ ; H₂ = H₂ ; H₂ gas = H₂ gazeux ; Solid Carbon (black powder) = carbone solide (poudre noire).

Questions de réflexion :

1. Pourquoi le carbone solide constitue-t-il un meilleur coproduit que le CO₂ ?
2. La pyrolyse du méthane est-elle entièrement « verte » ou repose-t-elle encore en partie sur des ressources fossiles ?

4.3. Décomposition thermochimique de l'eau

Au lieu de l'électricité, ces procédés utilisent une chaleur à très haute température, supérieure à 800 °C, pour entraîner des réactions chimiques qui décomposent l'eau en H₂ et en O₂. Les substances chimiques sont recyclées en circuit fermé, comme dans un manège chimique. Le cycle soufre-iode et les cycles à oxydes métalliques en sont des exemples. La chaleur peut provenir de tours solaires à concentration ou de réacteurs nucléaires de nouvelle génération.

- **Avantage :** aucune membrane d'électrolyseur coûteuse et rendement potentiellement très élevé lorsqu'une chaleur peu coûteuse est disponible ;
- **Limite :** les matériaux doivent résister à une chaleur extrême et à des substances chimiques corrosives ; les systèmes actuels se situent seulement aux TRL 4-5, à l'échelle du laboratoire ou de très petites installations pilotes.

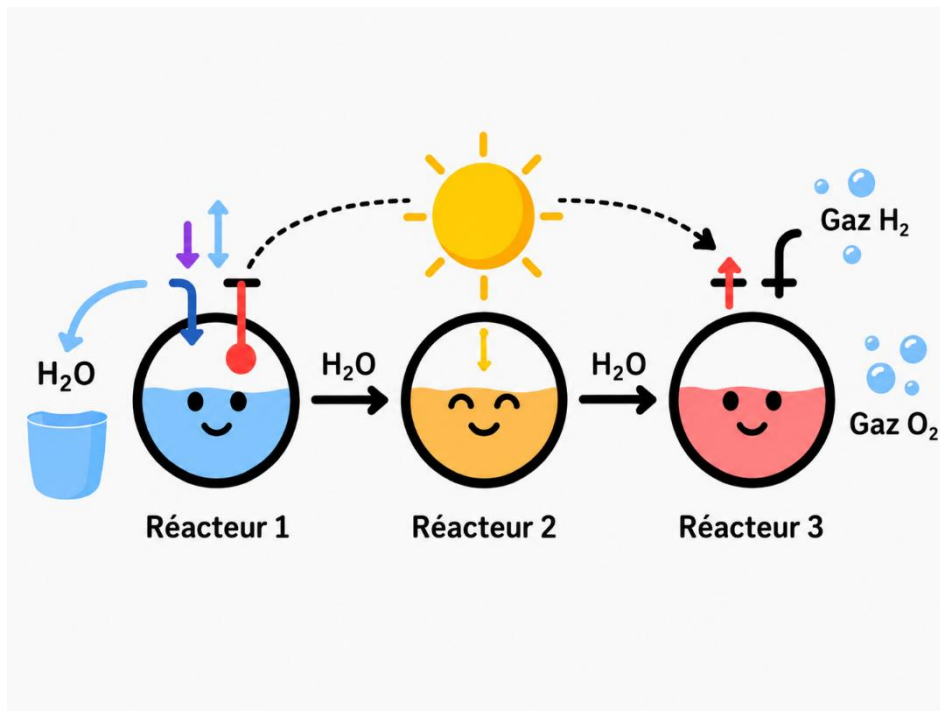


Figure 4.3. Représentation simplifiée d'un cycle de décomposition thermochimique de l'eau

Légende française des libellés de l'image : H₂O = H₂O ; Reactor 1 = réacteur 1 ; Reactor 2 = réacteur 2 ; Reactor 3 = réacteur 3 ; H₂ gas = H₂ gazeux ; O₂ gas = O₂ gazeux.

Questions de réflexion :

1. Pourquoi les procédés thermochimiques nécessitent-ils des températures supérieures à 800 °C ?
2. Nommez une source de chaleur gratuite ou peu coûteuse qui pourrait les alimenter.

4.4. Voies biologiques

L'hydrogène peut également être produit naturellement à l'aide d'organismes vivants tels que des bactéries, des algues ou des enzymes particulières. Ces méthodes sont appelées voies biologiques. Il en existe trois grands types :

- **Fermentation sombre** : des bactéries décomposent des déchets, par exemple des déchets organiques, en l'absence de lumière afin de produire de l'hydrogène ;
- **Photofermentation** : des bactéries ou des algues utilisent la lumière solaire pour contribuer à la production d'hydrogène ;
- **Cellules d'électrolyse microbienne** : des bactéries agissent avec une faible quantité d'électricité afin de décomposer l'eau et de produire de l'hydrogène sous faible tension.

Ces méthodes sont utiles, car elles peuvent utiliser des déchets et des processus naturels afin de produire une énergie propre.

- **Avantage** : elles peuvent utiliser des eaux usées, des déchets alimentaires ou des résidus agricoles ; ni eau douce ni combustible fossile ne sont nécessaires ;
- **Limite** : les vitesses de réaction et les rendements sont très faibles. Les systèmes actuels se situent encore aux TRL 3-4, uniquement à l'échelle du laboratoire.

Questions de réflexion :

1. Nommez une méthode biologique qui ne nécessite ni eau douce ni combustible fossile.
2. Pourquoi les voies biologiques ne sont-elles pas encore utilisées dans de grandes installations ?

4.5. Électrolyse de nouvelle génération : membranes AEM et membranes céramiques

Les électrolyseurs alcalins et PEM sont déjà utilisés aujourd'hui dans l'industrie. De nouveaux types sont toutefois en cours de développement afin de rendre la production d'hydrogène moins coûteuse et plus facile à mettre en œuvre.

- **Électrolyse à membrane échangeuse d'anions (AEM, *Anion Exchange Membrane*)** : cette méthode fonctionne dans un milieu alcalin, ou basique. Elle ne nécessite pas de métaux coûteux comme le platine et peut donc réduire les coûts. Elle est également plus facile à mettre en œuvre à grande échelle. Elle fait encore l'objet d'essais, mais est proche de l'utilisation commerciale.
- **Membranes céramiques conductrices de protons** : cette méthode fonctionne à très haute température, de manière similaire aux systèmes à oxyde solide. Elle peut utiliser la chaleur résiduelle des industries, ce qui améliore son rendement.

Ces nouvelles technologies figurent parmi les méthodes émergentes les plus avancées et devraient être utilisées à des fins commerciales dans un avenir proche.

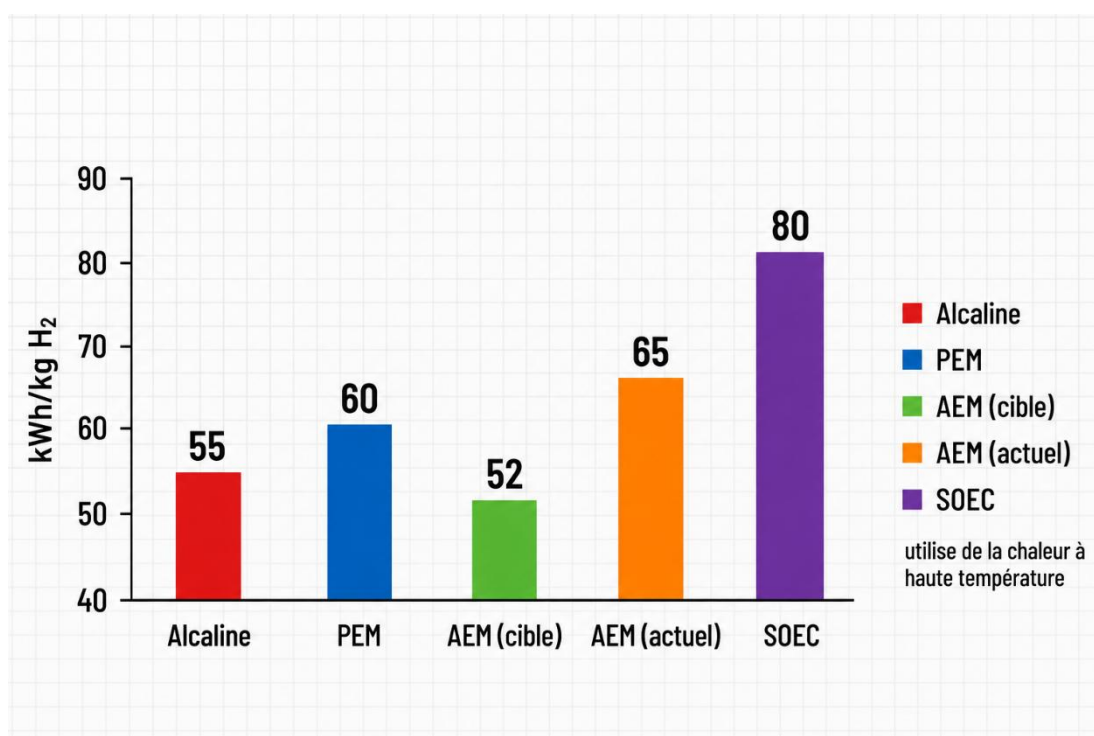


Figure 4.4. Comparaison du rendement électrique de différentes technologies d'électrolyse

Légende française des libellés de l'image : kWh/kg H₂ = kWh/kg de H₂ ; Alcaline = alcaline ; PEM = PEM ; AEM (target) = AEM (objectif) ; AEM (current) = AEM (actuelle) ; SOEC uses high heat = SOEC utilisant de la chaleur à haute température. Valeurs affichées : 55, 60, 52, 65 et 80 kWh/kg de H₂.

4.6. Eau de mer et valorisation des déchets en hydrogène

Il s'agit de nouvelles méthodes de production d'hydrogène qui contribuent à économiser l'eau et à réduire les déchets.

- **Électrolyse directe de l'eau de mer** : cette méthode utilise directement l'eau de mer, ou eau océanique, pour produire de l'hydrogène sans éliminer le sel au préalable. Elle est utile dans les pays arides où l'eau douce est limitée. Toutefois, le sel peut rapidement endommager les équipements par corrosion, ce qui reste un défi.
- **Valorisation des déchets en hydrogène** : cette méthode produit de l'hydrogène à partir de déchets tels que le plastique, les pneumatiques usagés et les ordures ménagères. Des procédés comme la gazéification ou la pyrolyse servent à convertir les déchets en hydrogène. Cette approche contribue à réduire la pollution et la mise en décharge tout en produisant une énergie utile.

Ces deux méthodes ne dépendent ni de combustibles fossiles ni d'eau douce, ce qui les rend adaptées à une économie circulaire, dans laquelle les déchets sont réutilisés. Elles font toutefois encore l'objet d'essais et ne sont pas encore largement utilisées.

Questions de réflexion :

1. Quel est l'un des principaux avantages de l'électrolyse directe de l'eau de mer ?
2. Pourquoi la valorisation des déchets en hydrogène est-elle bénéfique pour l'environnement ?

Tableau 4.1. Comparaison des principales technologies émergentes de production de H₂

Technologie	TRL (2025/2026)	Matière première	Apport énergétique	Principale difficulté
Pyrolyse du méthane (plasma)	5-6	Gaz naturel	Électricité (plasma)	Encrassement par le carbone et forte consommation d'énergie
Cycles thermochimiques	4-5	Eau pure	Chaleur à haute température (>800 °C)	Durabilité des matériaux à haute température
Production biologique	3-4	Eaux usées / biomasse	Lumière solaire ou faible puissance électrique	Vitesses très faibles et faible rendement
Électrolyse AEM	6-7	Eau pure ou légèrement salée	Électricité	Durée de vie de la membrane encore en cours d'amélioration
Électrolyse directe de l'eau de mer	4-5	Eau de mer	Électricité	Corrosion due au sel
Valorisation des déchets en hydrogène	5-6	Plastique / pneumatiques / déchets solides municipaux	Chaleur ou électricité	Impuretés dans les déchets utilisés comme matière première

Tableau 4.2. Matrice des principaux problèmes actuels

Technologie	Matière première	Principal problème actuel
Électrolyseurs alcalins	Eau (électrolyse)	Maintenance et durabilité
Électrolyseurs PEM	Eau purifiée	Problèmes thermiques (gestion de la chaleur)
Électrolyseurs à oxyde solide	Vapeur (eau à haute température)	Difficultés d'exploitation
Cellules photoélectrochimiques	Lumière solaire et eau	Pureté et rendement
Cellules d'électrolyse microbienne	Déchets organiques	Intégration et changement d'échelle
Électrolyse à haute température	Vapeur et énergie thermique	Alimentation énergétique et raccordement du système

Activité :

Activité en groupe (30 à 40 minutes) - Diagramme « maturité et impact »

Par groupes de quatre, dessinez une grille simple de 2×2 sur une feuille de tableau de conférence :

- **Axe des abscisses** : maturité (TRL faible → TRL élevé) ;
- **Axe des ordonnées** : impact futur (faible → élevé).

Placez les six technologies émergentes sur la grille à l'aide de notes repositionnables.

Discutez et présentez vos conclusions : dans quelle technologie les pays d'Afrique de l'Ouest devraient-ils investir en premier afin de créer des emplois de techniciens à long terme ? Pourquoi ?

4.7. Résumé du chapitre

Les technologies émergentes de production d'hydrogène se situent actuellement entre les niveaux de maturité technologique (TRL) 3 et 7, ce qui signifie qu'elles présentent un fort potentiel, mais ne sont pas encore entièrement commercialisées. La pyrolyse du méthane, par exemple, produit du carbone solide au lieu de dioxyde de carbone, ce qui en fait une solution plus propre souvent appelée hydrogène turquoise. Certaines méthodes, telles que les cycles thermochimiques, nécessitent des températures extrêmement élevées, généralement fournies par des sources d'énergie solaire ou nucléaire. D'autres approches, notamment les voies biologiques, l'électrolyse de l'eau de mer et la valorisation des déchets en hydrogène, évitent l'utilisation de combustibles fossiles et d'eau douce, ce qui les rend plus durables. Parmi ces nouvelles solutions, l'électrolyse à membrane échangeuse d'anions (AEM) est la plus proche d'une utilisation généralisée dans des applications commerciales.

Questions de révision

1. Que signifie le TRL 9 ? Réponse courte.
2. Quel est le principal avantage de la pyrolyse du méthane par rapport au SMR classique ?
3. Pourquoi les cycles de décomposition thermochimique de l'eau nécessitent-ils des températures supérieures à 800 °C ?
4. Quelle technologie émergente est actuellement la plus proche du déploiement commercial ? a) voies biologiques ; b) électrolyse AEM ; c) électrolyse directe de l'eau de mer.
5. Nommez une méthode émergente qui peut utiliser de l'eau de mer ou des déchets et ne nécessite pas d'eau douce.

Réponses : 1. technologie commerciale entièrement éprouvée ; 2. elle produit du carbone solide au lieu de CO₂ ; 3. pour entraîner les réactions chimiques sans électricité ; 4. b ; 5. électrolyse directe de l'eau de mer ou valorisation des déchets en hydrogène.

H2-B4 : PRINCIPES DU STOCKAGE, DU TRANSPORT ET DE LA DISTRIBUTION DE L'HYDROGÈNE

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

À l'issue de ce cours, les apprenants seront capables de :

- Identifier les méthodes de stockage de l'hydrogène ;
- Décrire les systèmes de transport et de distribution ;
- Reconnaître les considérations de sécurité associées.

CHAPITRE 1

STOCKAGE SOUS FORME COMPRIMÉE, LIQUIDE ET DANS DES MATÉRIAUX (H2-B4-1)

1.1. Importance du stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène consiste à conserver l'hydrogène en toute sécurité jusqu'au moment où il doit être utilisé. L'hydrogène est produit à un endroit donné, par exemple à l'aide de l'énergie solaire, mais il est souvent utilisé ailleurs ou à un autre moment. Il ne peut pas toujours être utilisé immédiatement après sa production. Le stockage permet de conserver l'énergie pour une utilisation ultérieure, de transporter l'hydrogène d'un endroit à un autre et d'assurer un approvisionnement énergétique continu, même lorsque la production s'interrompt, notamment la nuit lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible. La source indique que la figure 4.1 illustre la production, le stockage et l'utilisation de H₂ ainsi que les incidences environnementales.

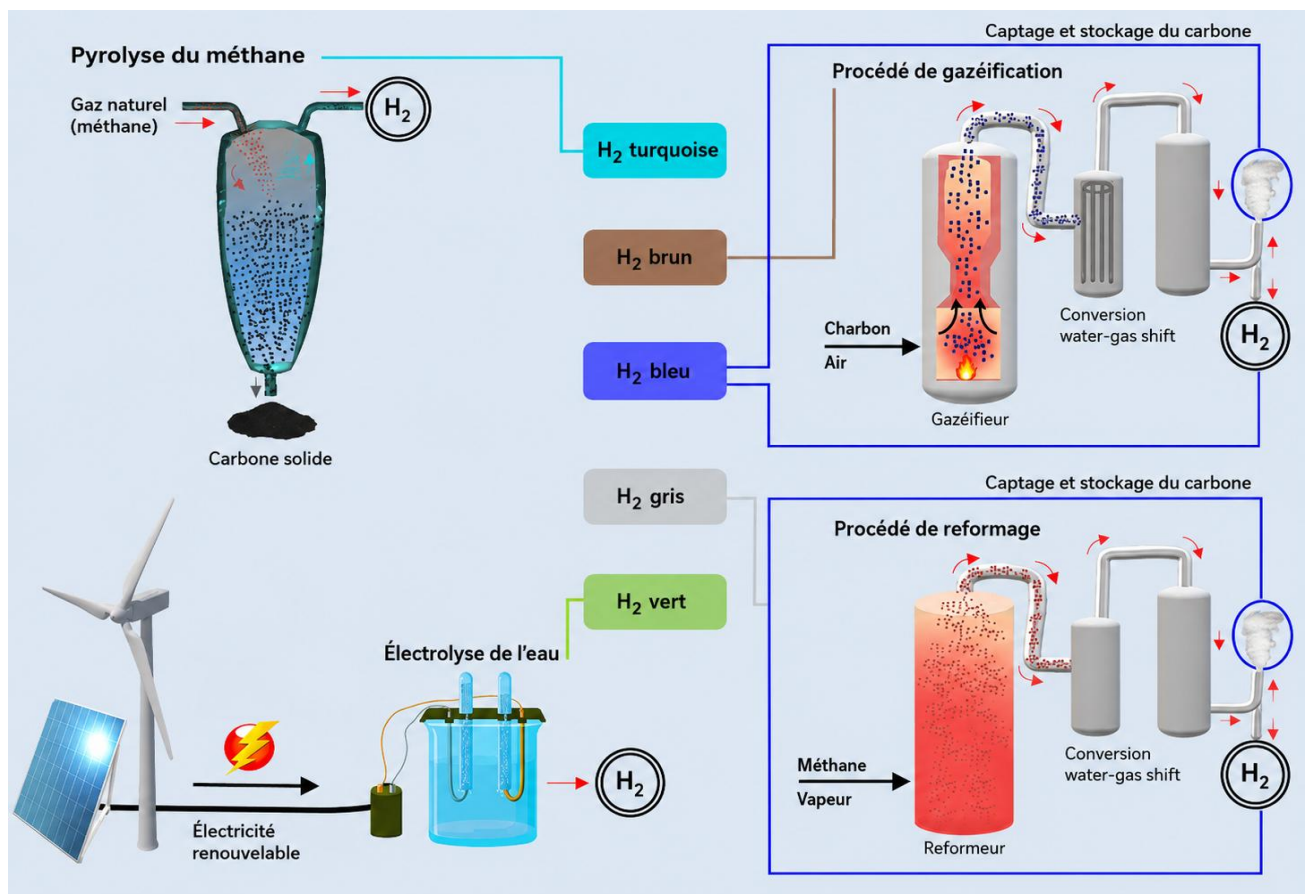


Figure 1.1. Processus global, de la production à l'utilisation de H₂

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, l'approvisionnement en électricité peut manquer de fiabilité et la population dépend souvent de groupes électrogènes diesel, coûteux et polluants. Parallèlement, l'énergie solaire est abondante, mais disponible uniquement pendant la journée. Le stockage de l'hydrogène peut contribuer à stocker l'énergie solaire pendant la journée et à fournir de l'électricité la nuit ou lors de coupures. Il réduit ainsi la dépendance au gazole et favorise une utilisation plus propre de l'énergie.

Par exemple, un système à hydrogène alimenté par l'énergie solaire dans un village fonctionne comme suit : des panneaux solaires produisent de l'électricité pendant la journée ; cette électricité sert à produire de l'hydrogène ; l'hydrogène est

stocké ; puis l'hydrogène stocké est utilisé la nuit pour l'éclairage ou la cuisson. Le diagramme de la figure 1.2 présente la production, le stockage et l'utilisation de H₂ vert :

Production solaire/éolienne → Stockage de l'hydrogène → Utilisation (véhicule, logement, industrie)

1. Production solaire/éolienne : les panneaux solaires et les éoliennes produisent de l'électricité renouvelable.

2. Production d'hydrogène : l'électricité alimente un électrolyseur qui décompose l'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et en oxygène (O₂). Cet hydrogène est appelé « hydrogène vert », car sa production présente des émissions de carbone quasi nulles.

3. Stockage de l'hydrogène : le H₂ produit est stocké sous différentes formes :

- réservoirs de gaz comprimé à haute pression ;
- hydrogène liquéfié, stocké à température cryogénique ;
- cavernes salines souterraines, pour le stockage à grande échelle ou de longue durée ;
- vecteurs chimiques, par exemple l'ammoniac ou les liquides organiques porteurs d'hydrogène (LOHC, *Liquid Organic Hydrogen Carriers*).

4. Utilisation :

- **Véhicules :** les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) reconvertissent le H₂ en électricité pour alimenter leurs moteurs ;
- **Logements :** l'hydrogène est utilisé pour le chauffage, la cuisson ou la production d'électricité au moyen de piles à combustible ;
- **Industrie :** l'industrie lourde l'utilise comme combustible propre ou comme matière première, notamment pour fabriquer de l'acier sans charbon, produire de l'ammoniac et réaliser des procédés chimiques.

Ce système permet le stockage d'énergie de longue durée et la décarbonation de secteurs difficiles à électrifier.

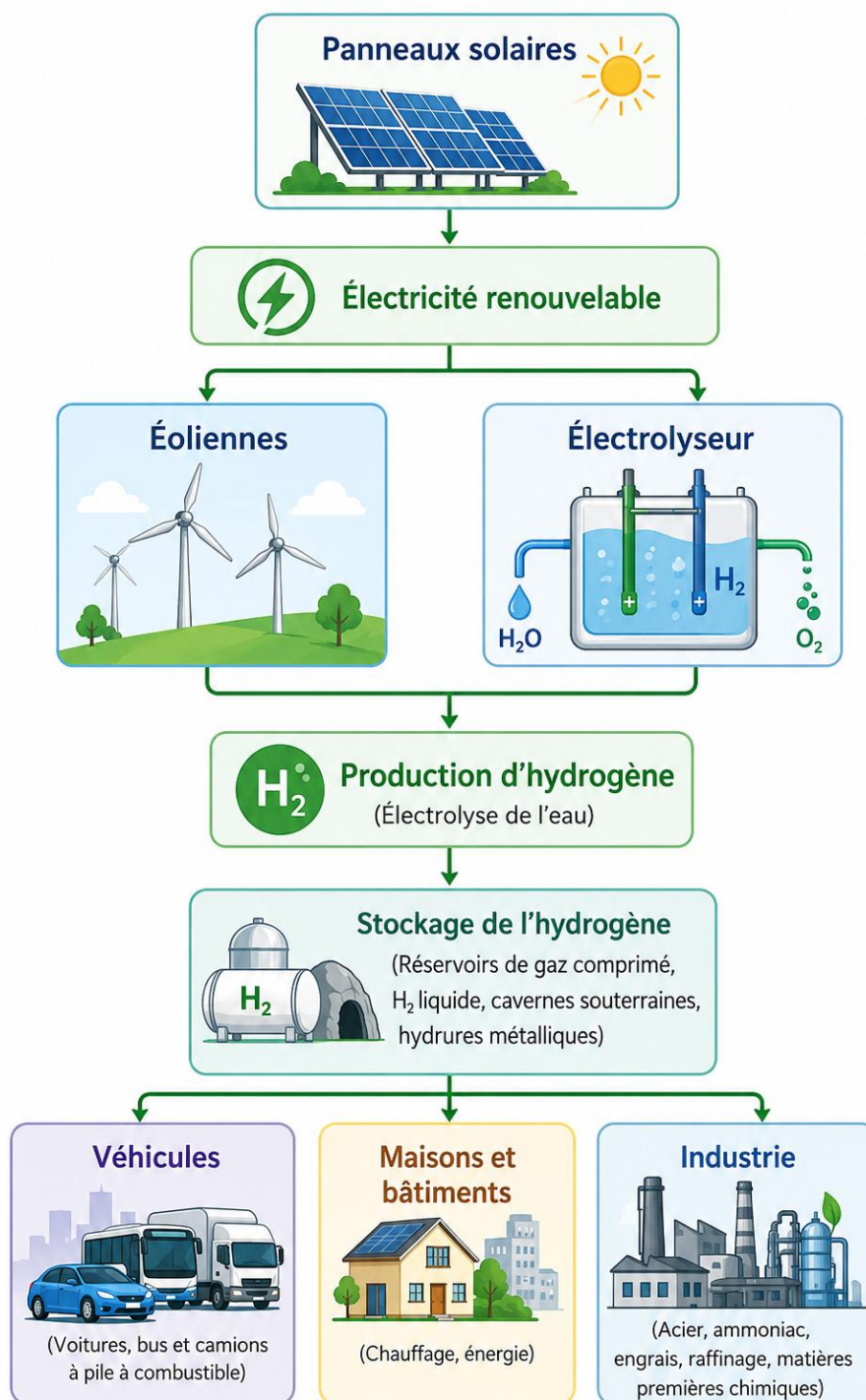


Figure 1.2. Diagramme des flux de production, de stockage et d'utilisation du H₂ vert

1.2. Stockage de l'hydrogène comprimé

L'hydrogène gazeux est stocké en le comprimant à haute pression dans des réservoirs résistants. Il est introduit dans une bouteille, puis comprimé afin d'occuper moins de volume. Il est ensuite conservé sous une pression très élevée, généralement comprise entre 350 et 700 bar. Dans cette méthode, l'hydrogène reste à l'état gazeux et nécessite des bouteilles robustes spécialement conçues. Il s'agit de l'une des méthodes de stockage les plus courantes et les plus répandues. La source indique que la figure 4.3 présente une bouteille haute pression munie de son robinet et de son manomètre, ainsi que les parois épaisses du réservoir utilisées pour le stockage de H₂ comprimé.

L'hydrogène comprimé est utilisé dans des véhicules à hydrogène tels que les voitures et les autobus, pour le stockage de gaz industriel et dans des systèmes énergétiques de petite taille.

Avantages : cette méthode repose sur une technologie relativement simple et facilite le transport en bouteilles. Elle convient aux applications de petite et moyenne taille.

Difficultés : la haute pression nécessite des matériaux résistants et parfois coûteux. Il existe également un risque de fuite si le système n'est pas manipulé correctement, et le gaz occupe davantage de volume que l'hydrogène liquide.

Considérations de sécurité : les bouteilles doivent être correctement fermées et contrôlées régulièrement. Elles doivent être protégées contre les dommages physiques et stockées dans des zones bien ventilées. Il est également important de les tenir éloignées des flammes et des fortes chaleurs.

Exemple : dans des pays comme le Nigeria ou le Ghana, les bouteilles d'hydrogène pourraient à l'avenir remplacer les bouteilles de GPL. Elles pourraient être transportées par camion vers les zones dépourvues de gazoducs.

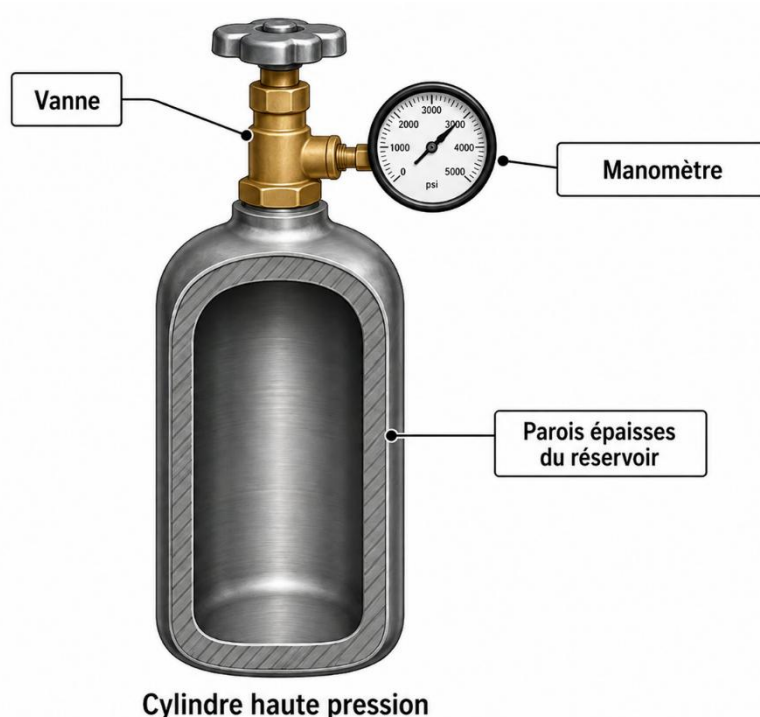


Figure 1.3. Bouteille haute pression et ses principaux éléments

1.3. Stockage de l'hydrogène liquide

L'hydrogène est refroidi à une température très basse (-253°C) jusqu'à devenir liquide. L'hydrogène gazeux est refroidi jusqu'à passer à l'état liquide. Il est ensuite stocké dans des réservoirs spéciaux appelés réservoirs cryogéniques, conçus pour maintenir des températures extrêmement basses. La source indique que la figure 4.4 représente un réservoir cryogénique composé d'une cuve intérieure contenant l'hydrogène liquide, de couches isolantes et d'une enveloppe extérieure de protection. Cette méthode permet à l'hydrogène d'occuper beaucoup moins de volume qu'à l'état gazeux, mais exige le maintien d'une température très basse.

Le stockage de l'hydrogène liquide est principalement utilisé pour le stockage à grande échelle, le transport sur de longues distances et les applications industrielles ou de recherche.

Avantages : cette méthode permet de stocker une grande quantité d'hydrogène dans un volume plus réduit, ce qui la rend efficace pour une utilisation à grande échelle.

Difficultés : elle nécessite des systèmes de refroidissement coûteux et une technologie avancée. Une partie de l'hydrogène peut s'évaporer lentement au fil du temps ; ce phénomène est appelé évaporation naturelle (*boil-off*).

Considérations de sécurité : il faut éviter tout contact avec le liquide extrêmement froid, qui peut provoquer des blessures. Une isolation appropriée est nécessaire et la pression doit être surveillée en raison d'une éventuelle évaporation. Par exemple, l'hydrogène liquide pourrait être utilisé dans de grands projets énergétiques de pays côtiers comme le Sénégal ou la Côte d'Ivoire, notamment en vue d'une future exportation d'hydrogène.

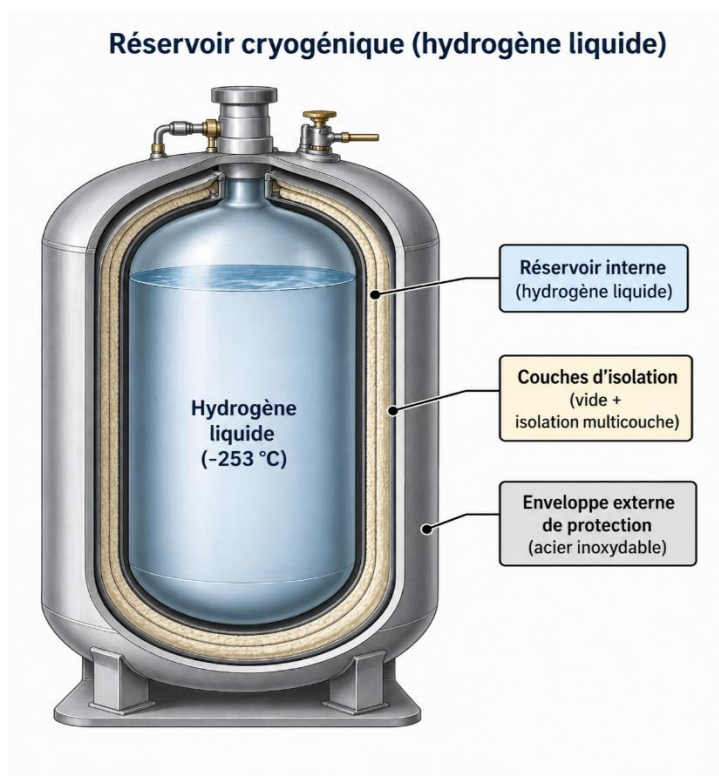


Figure 1.4. Réservoir de stockage de H_2 liquide (réservoir cryogénique)

1.4. Stockage dans des matériaux (stockage sous forme solide)

L'hydrogène est stocké dans des matériaux solides plutôt que sous forme de gaz ou de liquide. Il est absorbé par un matériau, par exemple un métal ou un composé chimique. Le matériau retient l'hydrogène en toute sécurité, puis celui-ci est libéré lorsque cela est nécessaire. Les matériaux couramment cités comprennent les hydrures métalliques, les vecteurs chimiques et les matériaux poreux conçus pour retenir l'hydrogène. Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme solide à une pression inférieure à celle du stockage gazeux, ce qui rend sa manipulation plus sûre et plus facile.

Avantages : le stockage dans des matériaux est généralement plus sûr que le stockage de gaz à haute pression, plus compact et moins exposé aux risques de fuite.

Difficultés : cette technologie est encore en cours de développement, peut être coûteuse et peut nécessiter de la chaleur ou des conditions particulières pour libérer l'hydrogène stocké.

Considérations de sécurité : une régulation appropriée de la température est importante, et les matériaux doivent être manipulés avec soin afin d'éviter toute contamination ou détérioration.

En Afrique de l'Ouest, cette méthode pourrait à l'avenir être utile pour les systèmes énergétiques domestiques, en particulier dans les zones rurales où des solutions simples et sûres sont nécessaires.

1.5. Comparaison des méthodes de stockage

Les méthodes de stockage sont sélectionnées en fonction de facteurs tels que le coût, la sécurité, les dimensions et l'application prévue. Comme le montre le tableau 1.1, le stockage sous forme de gaz comprimé est simple et largement utilisé ; l'hydrogène liquide offre une grande capacité de stockage, mais sa mise en œuvre est plus complexe ; le stockage

dans des matériaux est plus sûr, mais reste en cours de développement. Chaque méthode présente également des risques particuliers : le gaz comprimé comporte des dangers liés à la haute pression, l'hydrogène liquide exige la manipulation de températures extrêmement basses et le stockage dans des matériaux, bien que généralement plus sûr, nécessite toujours des précautions appropriées.

Le choix de la méthode de stockage dépend de la disponibilité des technologies, du coût des équipements, du niveau de sensibilisation à la sécurité et des infrastructures existantes. Par exemple, les zones rurales pourraient davantage bénéficier du stockage sous forme comprimée ou dans des matériaux, tandis que les zones industrielles pourraient employer des systèmes à hydrogène liquide.

Tableau 1.1. Comparaison des différentes méthodes de stockage

Type de stockage	Forme	Pression/température	Utilisation la mieux adaptée
Gaz comprimé	Gaz	Haute pression	Véhicules, petits systèmes
Hydrogène liquide	Liquide	Très basse température	Stockage à grande échelle
Stockage dans des matériaux	Solide	Basse pression	Applications sûres et futures

1.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, vous avez appris que l'hydrogène doit être stocké en toute sécurité afin de pouvoir être utilisé au moment et à l'endroit voulus. Le stockage joue un rôle important dans la fiabilité de l'approvisionnement énergétique, en particulier dans des régions comme l'Afrique de l'Ouest, où l'électricité peut être instable et l'énergie solaire abondante mais intermittente. Vous avez étudié trois méthodes principales de stockage : le gaz comprimé, l'hydrogène liquide et le stockage dans des matériaux. Chacune présente son propre principe de fonctionnement, ses avantages, ses difficultés et ses considérations de sécurité. Le stockage sous forme comprimée est simple et répandu ; le stockage liquide offre une grande capacité, mais exige des températures très basses ; le stockage dans des matériaux permet une manipulation plus sûre, mais reste en cours de développement. Comprendre ces méthodes aide à choisir la solution adaptée aux besoins locaux, au coût, à la sécurité et aux infrastructures disponibles.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Qu'est-ce que le stockage de l'hydrogène et pourquoi est-il important ?
2. Nommez les trois principales méthodes de stockage de l'hydrogène.
3. Dans quelles conditions l'hydrogène est-il stocké sous forme comprimée ?
4. Quelle température faut-il atteindre pour stocker l'hydrogène à l'état liquide ?
5. Qu'est-ce que le stockage de l'hydrogène dans des matériaux ?
6. Pourquoi le stockage de l'hydrogène est-il important pour les systèmes solaires en Afrique de l'Ouest ?
7. Donnez un avantage et une difficulté du stockage de l'hydrogène comprimé.
8. Expliquez pourquoi le stockage de l'hydrogène liquide nécessite des réservoirs spéciaux.
9. Comment le stockage dans des matériaux améliore-t-il la sécurité par rapport au stockage gazeux ?
10. Quelle méthode de stockage conviendrait le mieux aux zones rurales, et pourquoi ?
11. Citez deux précautions de sécurité à respecter lors de la manipulation de bouteilles d'hydrogène comprimé.
12. Pourquoi l'hydrogène liquide peut-il être dangereux à manipuler ?

13. Que faut-il faire pour prévenir les fuites d'hydrogène ?
14. Comparez le stockage sous forme comprimée et le stockage sous forme liquide en matière de coût et de complexité.
15. Dans votre communauté, quelle méthode de stockage de l'hydrogène serait la plus pratique ? Expliquez votre réponse.

CHAPITRE 2

VUE D'ENSEMBLE DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT EN HYDROGÈNE (H2-B4-2)

2.1. Qu'est-ce qu'une chaîne d'approvisionnement en hydrogène ?

Une chaîne d'approvisionnement en hydrogène désigne l'ensemble du processus de production, de stockage, de transport et d'utilisation de l'hydrogène. Elle montre comment l'hydrogène se déplace depuis son lieu de production jusqu'à son lieu d'utilisation finale. Elle comprend plusieurs étapes reliées entre elles, comme l'indique la figure 1.1. L'hydrogène est d'abord produit à partir de différentes sources d'énergie. Il est ensuite stocké en toute sécurité jusqu'à son utilisation. Puis il est transporté par gazoduc, camion ou navire. Enfin, il est livré aux utilisateurs finaux, par exemple aux véhicules, aux industries ou aux logements.

Une chaîne d'approvisionnement bien organisée garantit que l'hydrogène est disponible au moment et à l'endroit voulus. Elle contribue à réduire les pénuries d'énergie, améliore l'efficacité et favorise l'utilisation d'une énergie propre. En Afrique de l'Ouest, les systèmes énergétiques sont souvent fragmentés et de nombreuses zones ne disposent pas d'un approvisionnement électrique fiable. Une chaîne d'approvisionnement en hydrogène solide peut contribuer à relier les sites de production énergétique, tels que les parcs solaires ruraux, aux utilisateurs situés dans les villes et les zones industrielles. Elle peut aussi réduire la dépendance à l'égard de combustibles importés comme le gazole.

2.2. Sources de production de l'hydrogène

L'hydrogène peut être produit à partir de différentes sources d'énergie. Le choix de la source influe sur le coût, les incidences environnementales et la disponibilité. Il peut être produit à l'aide d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Dans ce procédé, l'électricité sert à décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Il s'agit de l'électrolyse, qui produit un hydrogène propre ou « hydrogène vert ». L'hydrogène peut également être produit à partir de gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles. Cette méthode est actuellement courante, mais elle génère des émissions de carbone, sauf si une technologie de captage du carbone est employée. De plus, des déchets agricoles tels que les pelures de manioc, les balles de riz et d'autres matières organiques peuvent servir à produire de l'hydrogène. Cette méthode contribue à réduire les déchets et la pollution tout en produisant une énergie utile.

L'Afrique de l'Ouest présente un fort potentiel solaire, ce qui la rend propice à la production d'hydrogène vert. Parallèlement, les déchets agricoles y sont largement disponibles et offrent des possibilités de production de biohydrogène dans les zones rurales. La figure 2.2 présente différentes sources de production d'hydrogène, notamment des panneaux solaires, des éoliennes, une installation au gaz naturel et de la biomasse ou des déchets agricoles.

Sources de production d'hydrogène

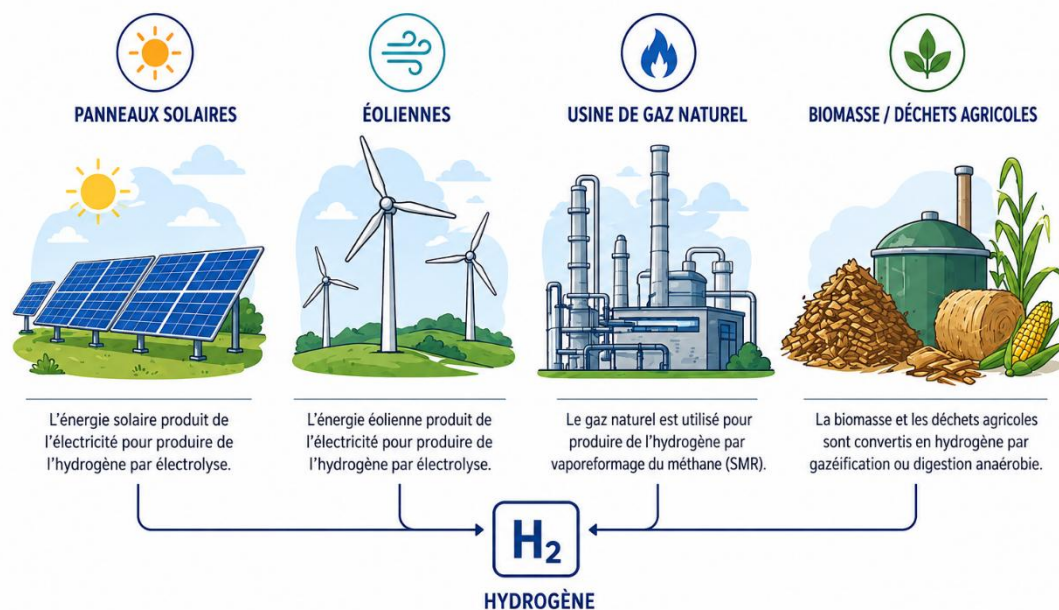


Figure 2.2. Différentes sources de production de l'hydrogène

2.3. Étapes de stockage et de distribution

Rôle du stockage dans la chaîne d'approvisionnement

Le stockage joue un rôle dans la chaîne d'approvisionnement : une fois produit, l'hydrogène doit être stocké en toute sécurité avant d'être transporté ou utilisé. Il garantit la disponibilité de l'énergie même lorsque la production n'est pas continue.

Distribution de l'hydrogène

La distribution consiste à déplacer l'hydrogène depuis les sites de stockage jusqu'aux utilisateurs. Elle peut s'effectuer par gazoduc, camion ou autre système de transport.

Types de systèmes de distribution

L'hydrogène peut être distribué localement, au sein d'une communauté, ou sur de longues distances, entre des régions ou des pays. La méthode employée dépend de la quantité d'hydrogène et de la distance à parcourir. Dans de nombreuses régions d'Afrique de l'Ouest, les infrastructures sont encore en cours de développement. La distribution de l'hydrogène pourrait, dans un premier temps, reposer sur des camions transportant des bouteilles, en particulier dans les zones rurales. À l'avenir, des gazoducs pourraient être aménagés dans les régions urbaines et industrielles. La figure 2.1 présente un schéma de type cartographique montrant un site de production, des installations de stockage, des itinéraires de transport et des utilisateurs finaux.



Figure 2.1. Schéma général d'un site de production de H₂, des installations de stockage, des itinéraires de transport et des utilisateurs

2.4. Méthodes de transport dans la chaîne d'approvisionnement

L'hydrogène peut être transporté de différentes manières selon la distance, la quantité et le coût.

- a) Transport par gazoduc** : les gazoducs servent à transporter l'hydrogène sur de longues distances. Ils permettent un approvisionnement continu et efficace, mais nécessitent un investissement initial élevé.
- b) Transport routier par camion** : l'hydrogène peut être transporté dans des bouteilles ou des réservoirs de liquide montés sur des camions. Cette méthode est flexible et convient aux zones dépourvues de gazoducs.
- c) Transport maritime par navire** : les navires peuvent acheminer de grandes quantités d'hydrogène liquide ou de combustibles dérivés de l'hydrogène entre les pays, notamment pour l'exportation et l'importation.

Avantages et difficultés

Chaque méthode de transport présente des avantages et des limites. Les gazoducs sont efficaces, mais coûteux à construire ; les camions sont flexibles, mais leur capacité est limitée ; les navires conviennent au transport à grande échelle, mais nécessitent des infrastructures avancées.

Actuellement, le transport routier constitue l'option la plus pratique dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest en raison de l'insuffisance des infrastructures de gazoducs. À l'avenir, les pays côtiers pourraient utiliser des navires pour exporter l'hydrogène.

2.5. Utilisateurs finaux de l'hydrogène

L'hydrogène peut être utilisé dans différents secteurs, notamment les transports, l'industrie et les logements.

- **Secteur des transports** : l'hydrogène peut alimenter des véhicules tels que les voitures, les autobus et les camions au moyen de piles à combustible. Ces véhicules ne produisent que de l'eau comme coproduit.

- **Utilisation industrielle :** les industries peuvent employer l'hydrogène pour des procédés comme la production d'acier, la fabrication d'engrais et la production d'énergie.
- **Utilisation dans les logements et les communautés :** l'hydrogène peut servir à la cuisson, à l'éclairage et à la production d'électricité dans les logements et les communautés, notamment dans les zones hors réseau.

En Afrique de l'Ouest, l'hydrogène peut favoriser :

- des systèmes de transport propres dans les villes ;
- le développement industriel ;
- l'électrification rurale là où le réseau électrique est limité.

2.5. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, vous avez appris que la chaîne d'approvisionnement en hydrogène comprend toutes les étapes, de la production à l'utilisation finale. L'hydrogène est produit à partir de différentes sources telles que l'énergie solaire, le gaz naturel et la biomasse, chacune présentant ses propres avantages et difficultés. Après sa production, l'hydrogène doit être stocké, puis distribué au moyen de systèmes tels que des gazoducs, des camions ou des navires. Le choix de la méthode de transport dépend du coût, de la distance et des infrastructures disponibles. Enfin, l'hydrogène est utilisé dans différents secteurs, notamment les transports, l'industrie et les logements. En Afrique de l'Ouest, le développement d'une chaîne d'approvisionnement en hydrogène solide peut améliorer l'accès à l'énergie, réduire la dépendance au gazole et favoriser un développement propre et durable.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Qu'est-ce qu'une chaîne d'approvisionnement en hydrogène ?
2. Énumérez les principales étapes de la chaîne d'approvisionnement en hydrogène.
3. Nommez deux sources renouvelables utilisées pour produire de l'hydrogène.
4. Qu'est-ce que l'électrolyse ?
5. Nommez trois méthodes de transport de l'hydrogène.
6. Pourquoi le stockage est-il important dans la chaîne d'approvisionnement en hydrogène ?
7. Expliquez un avantage de l'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène en Afrique de l'Ouest.
8. Pourquoi les camions sont-ils couramment utilisés pour transporter l'hydrogène dans les régions en développement ?
9. Décrivez comment l'hydrogène peut être utilisé dans les logements.
10. Quelles difficultés peuvent affecter la distribution de l'hydrogène dans les zones rurales ?
11. Pourquoi est-il important de manipuler l'hydrogène avec précaution pendant son transport ?
12. Que pourrait-il se passer si l'hydrogène fuyait pendant son transport ou son stockage ?
13. Pourquoi les systèmes de transport de l'hydrogène doivent-ils être contrôlés régulièrement ?
14. Comparez le transport de l'hydrogène par gazoduc et par camion en matière de coût et de flexibilité.
15. Comment les chaînes d'approvisionnement en hydrogène peuvent-elles contribuer à réduire l'utilisation des groupes électrogènes diesel dans votre communauté ?

CHAPITRE 3

GAZODUCS, BOUTEILLES ET SYSTÈMES DE RAVITAILLEMENT (H2-B4-3)

3.1. Gazoducs d'hydrogène

Les gazoducs d'hydrogène sont des canalisations servant à transporter l'hydrogène gazeux sur de longues distances, depuis les sites de production jusqu'aux installations de stockage ou aux utilisateurs finaux. L'hydrogène gazeux y est mis en mouvement au moyen de compresseurs. Ces canalisations sont généralement enterrées afin de les protéger contre les dommages et les conditions environnementales. Les gazoducs assurent un transport continu et efficace de grandes quantités d'hydrogène. Ils sont conçus avec des matériaux spéciaux afin de prévenir les fuites et de permettre une exploitation sûre avec de l'hydrogène.

Avantages : les gazoducs permettent de transporter efficacement l'hydrogène sur de longues distances et d'assurer un approvisionnement régulier. Une fois installés, ils peuvent fonctionner en continu avec des coûts d'exploitation relativement faibles.

Difficultés : la construction de gazoducs nécessite un investissement initial élevé et une planification rigoureuse. L'hydrogène peut également dégrader certains matériaux ; des matériaux de canalisation adaptés sont donc nécessaires.

Considérations de sécurité

Les gazoducs doivent être inspectés régulièrement afin de détecter les fuites ou les dommages. Des systèmes de surveillance sont utilisés pour détecter les variations de pression et garantir une exploitation sûre.

En Afrique de l'Ouest, les gazoducs d'hydrogène sont encore peu nombreux, mais ils pourraient être développés à l'avenir, notamment dans les zones industrielles ou entre de grandes villes où la demande d'hydrogène est élevée.

3.2. Bouteilles et réservoirs d'hydrogène

Les bouteilles et les réservoirs d'hydrogène sont des récipients utilisés pour stocker et transporter l'hydrogène gazeux ou liquide.

Types de bouteilles et de réservoirs

Il existe de petites bouteilles portatives utilisées pour le transport local et de grands réservoirs destinés au stockage industriel. Certains réservoirs contiennent du gaz comprimé, tandis que d'autres renferment de l'hydrogène liquide. L'hydrogène est introduit dans les bouteilles ou les réservoirs dans des conditions contrôlées. Les récipients sont fermés hermétiquement afin d'éviter les fuites et sont conçus pour résister à une haute pression ou à de très basses températures.

Avantages : les bouteilles et les réservoirs offrent une solution flexible et peuvent être transportés facilement vers différents sites. Ils sont utiles lorsque les gazoducs ne sont pas disponibles.

Difficultés : leur capacité de stockage est limitée par rapport aux gazoducs et ils peuvent nécessiter des remplissages fréquents. Leur manipulation et leur transport doivent être effectués avec précaution.

Considérations de sécurité : les bouteilles doivent être manipulées avec soin, maintenues verticalement et stockées dans des zones ventilées. Une inspection régulière est nécessaire afin de prévenir les fuites ou les dommages.

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, des bouteilles sont déjà utilisées pour le GPL. Des systèmes similaires pourraient être adaptés à la distribution de l'hydrogène, notamment dans les zones rurales et périurbaines.

3.3. Transport routier et maritime

Transport routier de l'hydrogène

L'hydrogène peut être transporté par des camions chargés de bouteilles ou de réservoirs d'hydrogène liquide. Cette méthode est flexible et convient aux zones dépourvues de gazoducs.

Transport maritime de l'hydrogène

Les navires servent à transporter de grandes quantités d'hydrogène, notamment sous forme liquide, entre des pays ou des régions.

L'hydrogène est chargé dans des conteneurs sécurisés, acheminé jusqu'à sa destination, puis déchargé en vue de son stockage ou de son utilisation.

Avantages : le transport routier est flexible et peut desservir des zones isolées. Le transport maritime permet d'acheminer efficacement de grandes quantités sur de longues distances.

Difficultés : le transport routier a une capacité limitée et peut nécessiter de nombreux trajets. Le transport maritime exige des navires et des infrastructures spécialisés.

Considérations de sécurité : les véhicules de transport doivent respecter les normes de sécurité, notamment en matière d'étiquetage approprié, d'arrimage sûr des réservoirs et d'inspection régulière. Les conducteurs et les opérateurs doivent être formés à la manipulation sûre de l'hydrogène.

Le transport routier constitue actuellement l'option la plus pratique dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest en raison du manque d'infrastructures. Des pays côtiers tels que le Ghana et le Sénégal pourraient utiliser des navires pour de futurs échanges commerciaux d'hydrogène.

3.4. Stations de ravitaillement en hydrogène

Une station de ravitaillement en hydrogène est une installation où de l'hydrogène est fourni aux véhicules, de manière comparable à une station-service d'essence ou de gazole.

Principaux composants d'une station de ravitaillement

Une station type, représentée à la figure 3.1, comprend des réservoirs de stockage d'hydrogène, des compresseurs, des systèmes de refroidissement et des bornes de distribution.

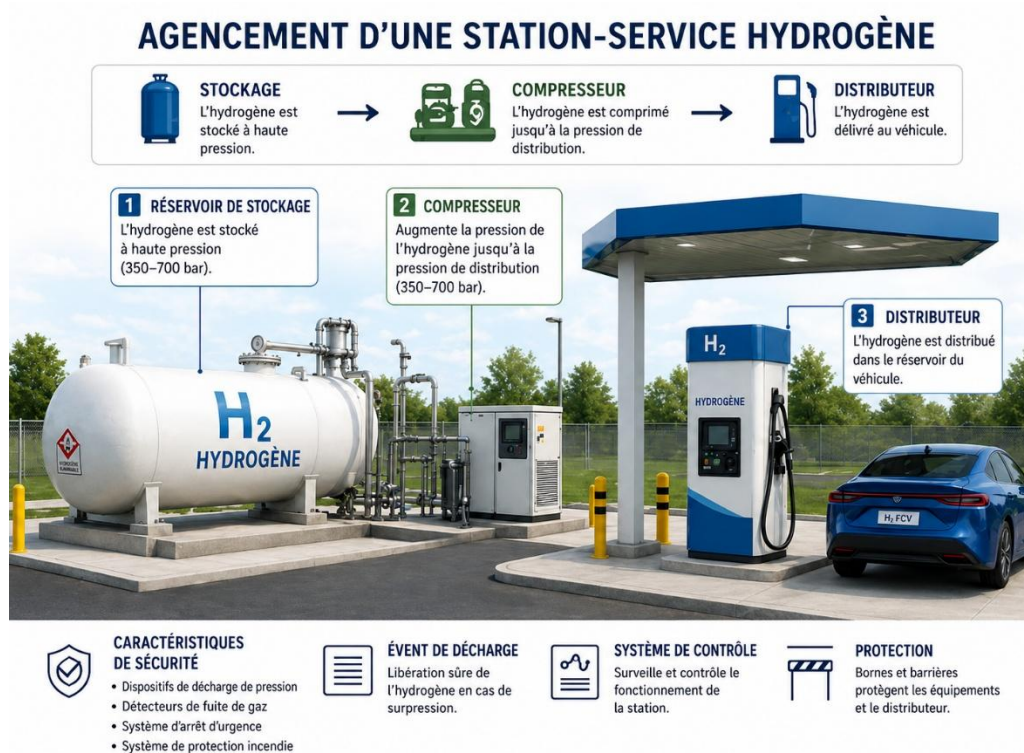


Figure 3.1. Implantation d'une station de ravitaillement en hydrogène : réservoir de stockage, compresseur et borne de distribution

Fonctionnement des stations de ravitaillement

L'hydrogène est stocké dans la station, comprimé à la pression requise, puis transféré dans le réservoir du véhicule par l'intermédiaire d'une borne de distribution.

Avantages : les stations de ravitaillement permettent l'utilisation de véhicules à hydrogène et favorisent des systèmes de transport propres.

Difficultés : l'installation de stations de ravitaillement nécessite des investissements et des infrastructures. De nombreuses régions ne comptent actuellement que très peu de stations de ce type.

Considérations de sécurité : les stations doivent être correctement conçues et équipées de dispositifs de sécurité tels que des détecteurs de fuites, une ventilation et des systèmes d'arrêt d'urgence.

Les stations de ravitaillement en hydrogène ne sont pas encore courantes en Afrique de l'Ouest, mais elles pourraient être introduites à l'avenir à mesure que les véhicules à hydrogène se développeront, notamment dans les grandes villes.

3.5. Processus de ravitaillement des véhicules

Le ravitaillement d'un véhicule à hydrogène consiste à raccorder le véhicule à une borne de distribution et à transférer l'hydrogène dans son réservoir sous haute pression. La source annonce un diagramme séquentiel montrant comment les véhicules à hydrogène sont ravitaillés. Pour ravitailler un véhicule en H₂, celui-ci est d'abord immobilisé dans la station. Le pistolet de distribution est ensuite raccordé de manière sûre au réservoir du véhicule. L'hydrogène est transféré dans le réservoir puis, une fois celui-ci plein, le pistolet est retiré. Le ravitaillement en hydrogène est rapide et ne dure généralement que quelques minutes, comme le remplissage d'un véhicule à essence ou diesel.

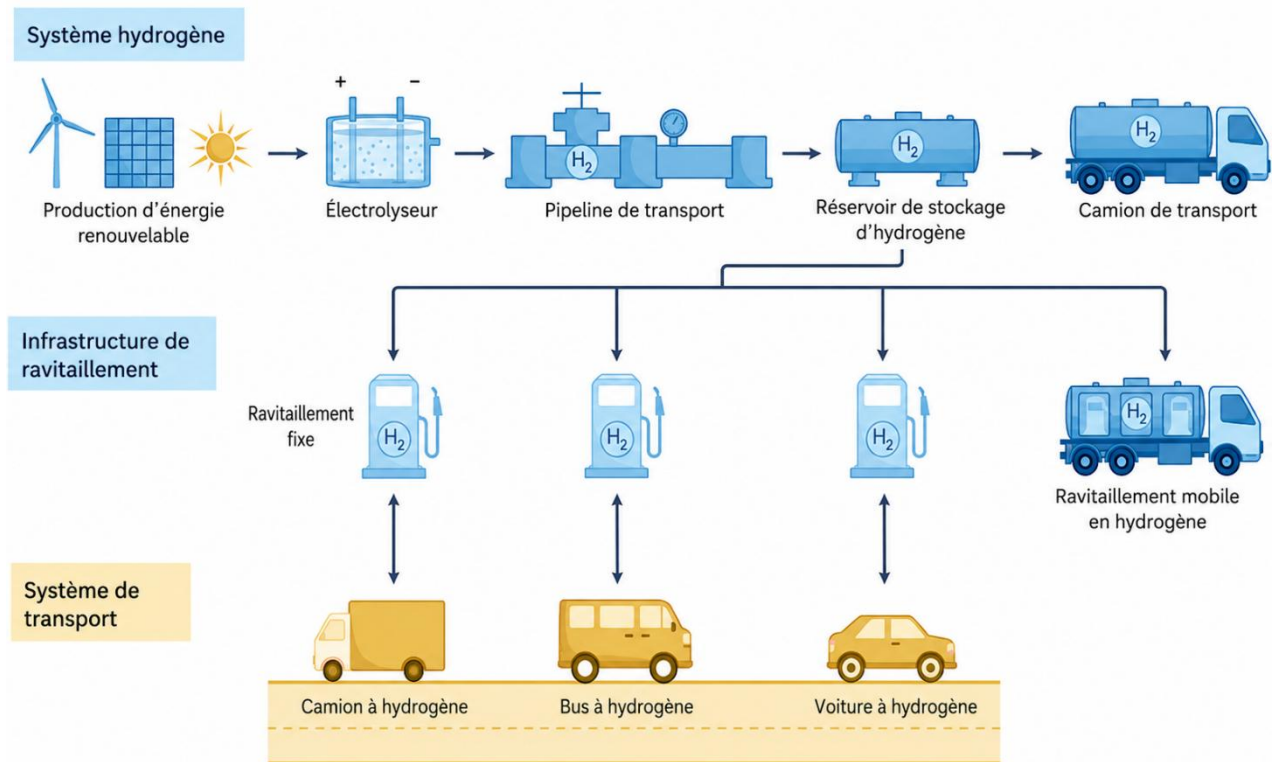


Figure 3.2. Processus de ravitaillement des véhicules en hydrogène

Avantages : le processus est rapide et pratique, ce qui permet l'utilisation quotidienne des véhicules à hydrogène.

Considérations de sécurité : il est important de raccorder correctement le pistolet afin d'éviter les fuites. Le système régule automatiquement la pression et s'arrête lorsque le réservoir est plein.

À mesure que le transport à hydrogène se développera en Afrique de l'Ouest, des systèmes de ravitaillement simples et sûrs seront importants pour favoriser l'acceptation par le public et une utilisation généralisée.

3.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, vous avez étudié les principaux systèmes utilisés pour transporter et livrer l'hydrogène, notamment les gazoducs, les bouteilles et les stations de ravitaillement. Les gazoducs permettent de déplacer efficacement l'hydrogène sur de longues distances, tandis que les bouteilles et les réservoirs offrent des solutions flexibles de stockage et de transport, en particulier dans les zones dépourvues de gazoducs. L'hydrogène peut également être transporté par route, à l'aide de camions, ou par mer, à l'aide de navires spécialisés. Les stations de ravitaillement jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement des véhicules en hydrogène et rendent possibles des transports propres. Comprendre ces systèmes est important afin de garantir une distribution fiable de l'hydrogène et une exploitation sûre, notamment en Afrique de l'Ouest, où les infrastructures sont encore en développement et où des solutions flexibles sont nécessaires.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Qu'est-ce qu'un gazoduc d'hydrogène ?
2. Nommez deux types de récipients de stockage de l'hydrogène.
3. Comment l'hydrogène est-il transporté par route ?
4. Qu'est-ce qu'une station de ravitaillement en hydrogène ?
5. Combien de temps faut-il généralement pour ravitailler un véhicule à hydrogène ?
6. Pourquoi les gazoducs sont-ils efficaces pour transporter l'hydrogène ?

7. Pourquoi les bouteilles sont-elles importantes dans les zones dépourvues de gazoducs ?
8. Expliquez un avantage du transport routier de l'hydrogène.
9. Quels sont les principaux composants d'une station de ravitaillement en hydrogène ?
10. Pourquoi le ravitaillement en hydrogène est-il considéré comme pratique ?
11. Pourquoi les bouteilles d'hydrogène doivent-elles être manipulées avec précaution ?
12. Quelles mesures de sécurité sont nécessaires pour les gazoducs d'hydrogène ?
13. Pourquoi un raccordement correct est-il important lors du ravitaillement d'un véhicule ?
14. Comparez les gazoducs et les camions pour le transport de l'hydrogène en matière de coût et de flexibilité.
15. Quelles difficultés l'Afrique de l'Ouest pourrait-elle rencontrer lors de la construction de stations de ravitaillement en hydrogène ?

CHAPITRE 4

EXIGENCES FONDAMENTALES EN MATIÈRE D'INFRASTRUCTURES (H2-B4-4)

4.1. Infrastructures hydrogène

Les infrastructures hydrogène désignent les systèmes et les installations nécessaires pour produire, stocker, transporter et utiliser l'hydrogène. Elles comprennent tous les éléments, depuis les installations de production jusqu'aux gazoducs et aux stations de ravitaillement : installations de production, systèmes de stockage, réseaux de transport et applications finales. Tous ces composants doivent fonctionner ensemble pour que le système soit efficace.

Sans infrastructures appropriées, l'hydrogène ne peut pas être livré de manière sûre ou efficace. Des infrastructures adaptées garantissent un approvisionnement énergétique fiable et favorisent le développement de l'utilisation de l'hydrogène dans différents secteurs.

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, les infrastructures énergétiques sont encore en cours de développement. Elles rencontrent des difficultés telles qu'un approvisionnement électrique peu fiable et des réseaux de transport limités. Les infrastructures hydrogène peuvent contribuer à améliorer l'accès à l'énergie, notamment dans les zones rurales, et à réduire la dépendance aux groupes électrogènes diesel. La source indique que la figure 1.1 ci-dessus présente un schéma général combinant la production, le stockage, le transport et l'utilisation.

4.2. Installations de production (unités d'électrolyse)

Les installations de production sont des sites où l'hydrogène est produit. L'électrolyse est une méthode courante : l'électricité sert à décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Dans ce procédé, un courant électrique traverse l'eau dans un électrolyseur et la sépare en hydrogène et en oxygène gazeux. Lorsque des sources d'énergie renouvelables sont utilisées, l'hydrogène produit est propre et appelé « hydrogène vert ». Une installation d'électrolyse comprend un système d'alimentation en eau, un électrolyseur, une source d'énergie, par exemple solaire ou éolienne, et des systèmes de collecte des gaz.

Avantages : l'électrolyse utilisant de l'énergie renouvelable produit un hydrogène propre et réduit la pollution. Elle convient aux régions bénéficiant d'un fort ensoleillement ou de vents abondants.

Difficultés : les systèmes d'électrolyse peuvent être coûteux à installer et nécessitent un approvisionnement régulier en eau et en électricité.

L'Afrique de l'Ouest dispose d'un fort potentiel solaire, ce qui la rend idéale pour l'électrolyse alimentée par l'énergie solaire. Des systèmes de petite taille peuvent être utilisés dans les communautés rurales afin de produire de l'hydrogène localement.

4.3. Installations et systèmes de stockage

Les installations de stockage sont des sites où l'hydrogène est conservé en toute sécurité avant son utilisation ou son transport. Elles peuvent comprendre des réservoirs, des bouteilles ou des systèmes de stockage souterrain. La figure 4.1 représente un site de stockage d'hydrogène avec des réservoirs, une clôture de sécurité et des systèmes de surveillance. L'hydrogène peut être stocké sous forme de gaz comprimé, d'hydrogène liquide ou dans des matériaux solides, selon l'application et l'échelle. Les sites de stockage sont conçus avec des dispositifs de sécurité tels que des systèmes de régulation de la pression, une ventilation et des barrières de protection afin de prévenir les accidents.

Avantages : les installations de stockage garantissent la disponibilité de l'hydrogène au moment voulu et contribuent à équilibrer l'offre et la demande.

Difficultés : la construction d'installations de stockage nécessite une planification rigoureuse, des mesures de sécurité et des investissements.

Considérations de sécurité : les zones de stockage doivent être bien ventilées et surveillées régulièrement. Des dispositifs de sécurité tels que des soupapes de décharge de pression et des détecteurs de fuites sont importants.

En Afrique de l'Ouest, les installations de stockage peuvent aller de petits systèmes communautaires à de grands sites industriels. Une conception appropriée est importante pour garantir leur sécurité et leur fiabilité.

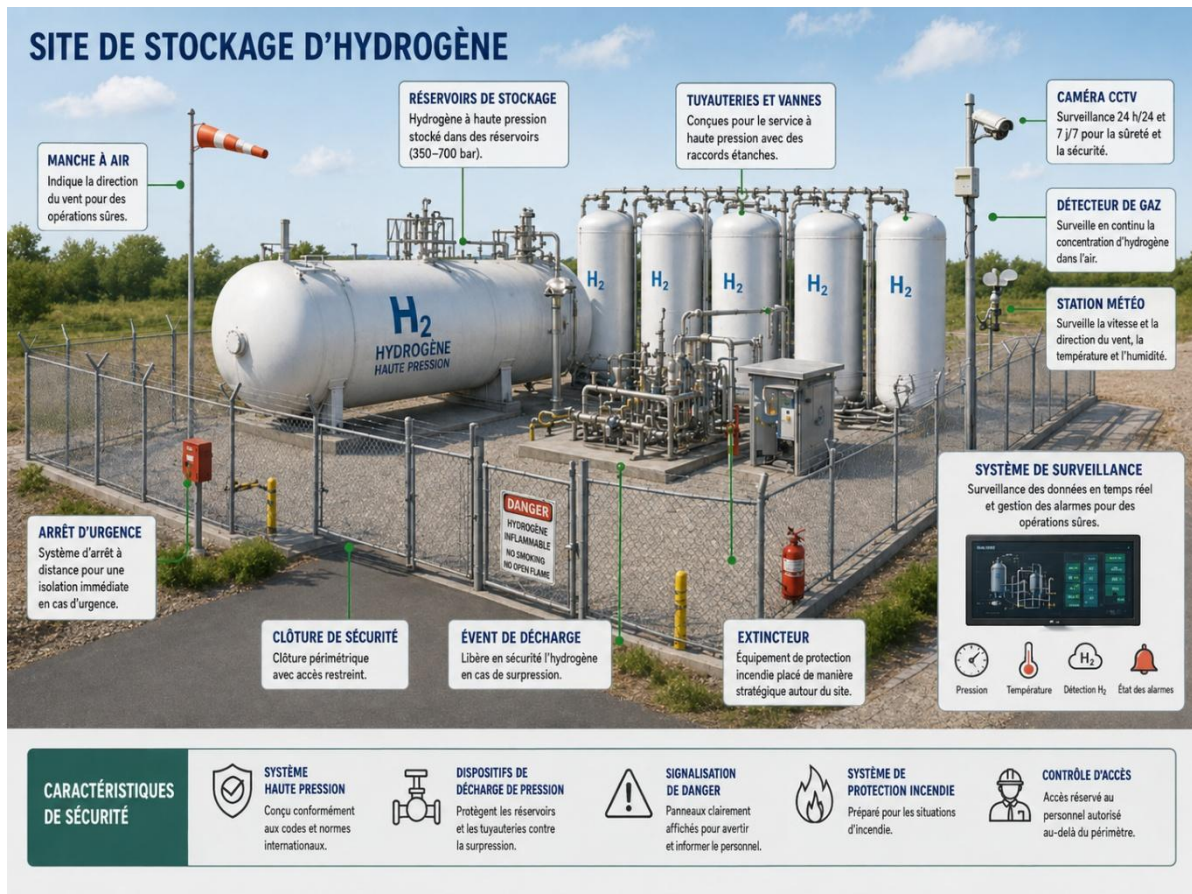


Figure 4.1. Site de stockage d'hydrogène comportant des réservoirs, une clôture de sécurité et des systèmes de surveillance

4.4. Réseaux de transport et de distribution

Les réseaux de transport et de distribution sont les systèmes utilisés pour acheminer l'hydrogène depuis les sites de production jusqu'aux installations de stockage et aux utilisateurs finaux. L'hydrogène peut être transporté par gazoduc, camion ou navire. La distribution peut s'effectuer localement ou sur de longues distances. L'hydrogène est acheminé par le réseau et livré à des utilisateurs tels que les industries, les stations de ravitaillement ou les logements.

Avantages : des réseaux de transport et de distribution efficaces garantissent que l'hydrogène parvient aux utilisateurs de manière efficace et fiable.

Difficultés : le développement de ces réseaux nécessite des investissements dans les infrastructures et une coordination. Dans certaines régions, les systèmes de transport peuvent être limités.

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, le transport routier est actuellement la méthode la plus courante. Avec le temps, des gazoducs et des systèmes plus avancés pourraient être développés dans les zones urbaines et industrielles.

4.5. Systèmes auxiliaires

Les systèmes auxiliaires sont les systèmes supplémentaires nécessaires au bon fonctionnement des infrastructures hydrogène. Ils comprennent l'alimentation en eau, l'alimentation électrique et les systèmes de commande.

a) Alimentation en eau : l'eau est nécessaire à la production d'hydrogène par électrolyse. Des sources d'eau propres et fiables sont importantes pour un fonctionnement efficace.

b) Alimentation électrique : l'électricité est nécessaire au fonctionnement des électrolyseurs et des autres équipements. Les sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien sont privilégiées pour produire un hydrogène propre.

c) Systèmes de commande et de surveillance : les systèmes de commande servent à surveiller la pression, la température et le débit de l'hydrogène. Ils contribuent à garantir une exploitation sûre et efficace.

Avantages : les systèmes auxiliaires améliorent le rendement, la sécurité et la fiabilité des infrastructures hydrogène.

Difficultés : l'accès à une eau propre et à une électricité fiable peut être difficile dans certaines régions.

En Afrique de l'Ouest, l'intégration de l'énergie solaire aux systèmes hydrogène peut fournir une énergie fiable. Les forages et les cours d'eau peuvent servir de sources d'eau, mais une gestion appropriée de l'eau est importante. La figure 4.2 présente un diagramme de l'alimentation en eau, de l'entrée électrique et des unités de surveillance et de commande.

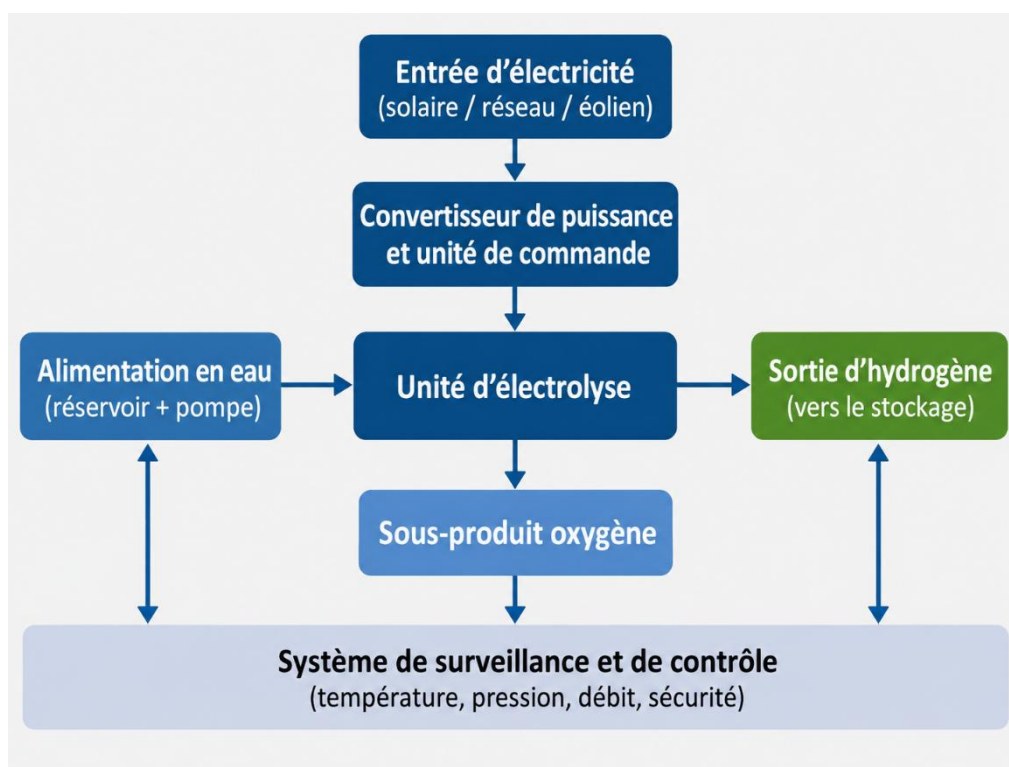


Figure 4.2. Diagramme de l'alimentation en eau, de l'entrée électrique et des unités de surveillance et de commande

4.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, vous avez appris que les infrastructures hydrogène comprennent tous les systèmes nécessaires pour produire, stocker, transporter et utiliser l'hydrogène. Les installations de production telles que les unités d'électrolyse jouent un rôle essentiel dans la production d'hydrogène, notamment lorsqu'elles sont alimentées par des sources d'énergie renouvelables comme le solaire et l'éolien. Les installations de stockage garantissent la disponibilité de l'hydrogène au moment voulu, tandis que les réseaux de transport et de distribution l'acheminent vers différents utilisateurs. Les systèmes auxiliaires, notamment l'alimentation en eau, l'électricité et les systèmes de surveillance, sont indispensables à une exploitation sûre et efficace. En Afrique de l'Ouest, le développement d'infrastructures hydrogène peut améliorer l'accès à

l'énergie, réduire la dépendance au gazole et favoriser un développement durable, mais il nécessite également une planification rigoureuse et des investissements.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Qu'est-ce qu'une infrastructure hydrogène ? Nommez deux composants principaux d'une infrastructure hydrogène.
2. À quoi sert l'électrolyse ? Comment produit-elle de l'hydrogène ?
3. À quoi servent les installations de stockage ?
4. Nommez deux systèmes auxiliaires nécessaires aux infrastructures hydrogène.
5. Pourquoi les infrastructures sont-elles importantes pour les systèmes énergétiques à hydrogène ?
6. Pourquoi les installations de stockage sont-elles nécessaires dans la chaîne d'approvisionnement en hydrogène ?
7. Quelles difficultés affectent les réseaux de transport de l'hydrogène ?
8. Comment l'énergie solaire peut-elle favoriser la production d'hydrogène en Afrique de l'Ouest ?
9. Pourquoi les installations de stockage d'hydrogène doivent-elles être bien ventilées ?
10. Quel rôle les systèmes de surveillance jouent-ils dans la sécurité ?
11. Pourquoi une gestion appropriée de l'eau est-elle importante dans la production d'hydrogène ?
12. Quelles difficultés d'infrastructure les zones rurales d'Afrique de l'Ouest pourraient-elles rencontrer lors de l'adoption de l'énergie hydrogène ?
13. Proposez un moyen par lequel les infrastructures hydrogène pourraient réduire l'utilisation de groupes électrogènes diesel dans votre communauté.

CHAPITRE 5

SÉCURITÉ DU STOCKAGE ET DU TRANSPORT (H2-B4-5)

5.1. Importance de la sécurité de l'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique utile et propre, mais il doit être manipulé avec précaution afin d'éviter les accidents. Comme de nombreux combustibles, il peut être dangereux s'il n'est pas correctement maîtrisé. Il est très inflammable, peut être stocké sous haute pression et brûle avec une flamme presque invisible. La figure 5.1 présente des symboles de sécurité relatifs à l'inflammabilité, à la haute pression et à la flamme invisible. Ces caractéristiques rendent indispensable le respect de pratiques de sécurité strictes.

La sécurité permet d'utiliser l'hydrogène sans porter atteinte aux personnes, aux biens ou à l'environnement. Des mesures de sécurité appropriées instaurent la confiance et favorisent une utilisation plus large des technologies de l'hydrogène.

En Afrique de l'Ouest, la sensibilisation à la sécurité est particulièrement importante, car les systèmes hydrogène peuvent être nouveaux pour de nombreux utilisateurs. Une formation et des consignes de sécurité claires peuvent contribuer à prévenir les accidents et à garantir une adoption sûre, en particulier dans les communautés déjà familiarisées avec des combustibles comme le GPL et le gazole.

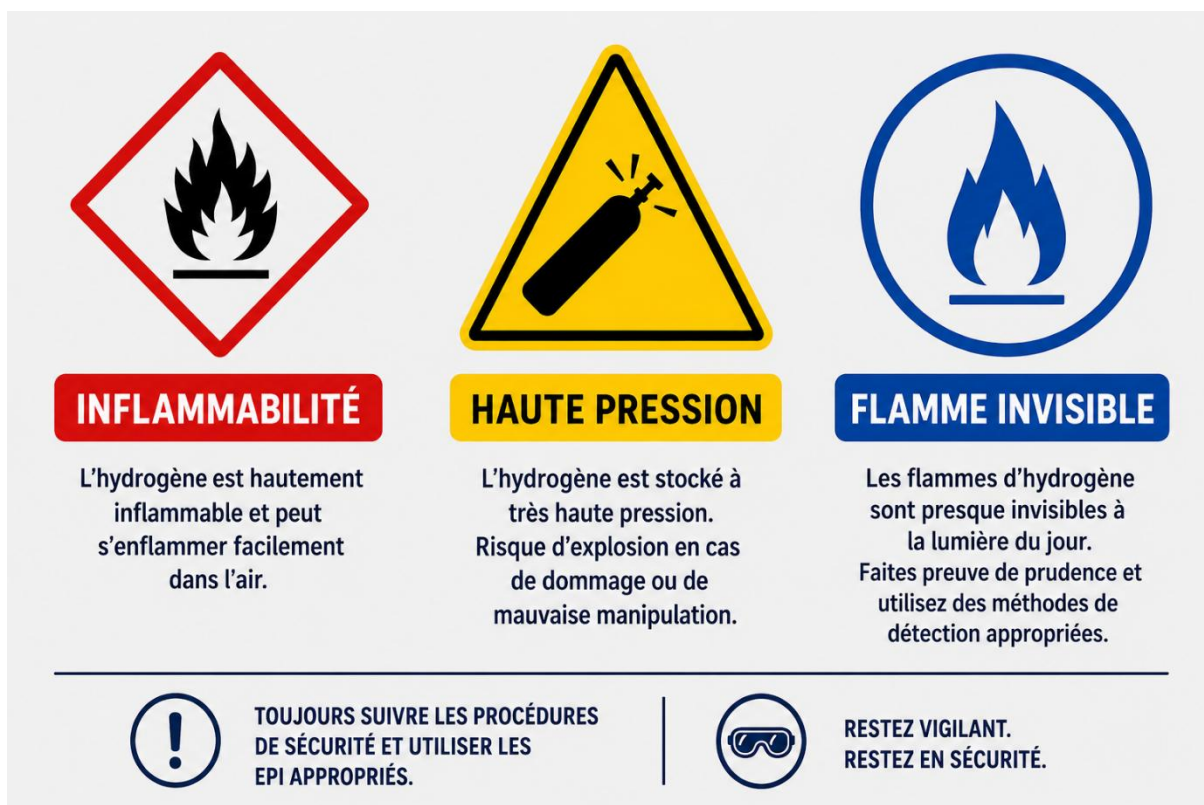


Figure 5.1. Dangers associés à l'hydrogène

5.2. Propriétés de l'hydrogène liées à la sécurité

L'hydrogène présente plusieurs propriétés physiques et chimiques qui influent sur son comportement et sur les précautions nécessaires à sa manipulation.

- **Faible masse volumique** : l'hydrogène est le gaz le plus léger et s'élève rapidement dans l'air. Dans un espace ouvert, il peut donc se disperser rapidement, ce qui réduit le risque d'accumulation.

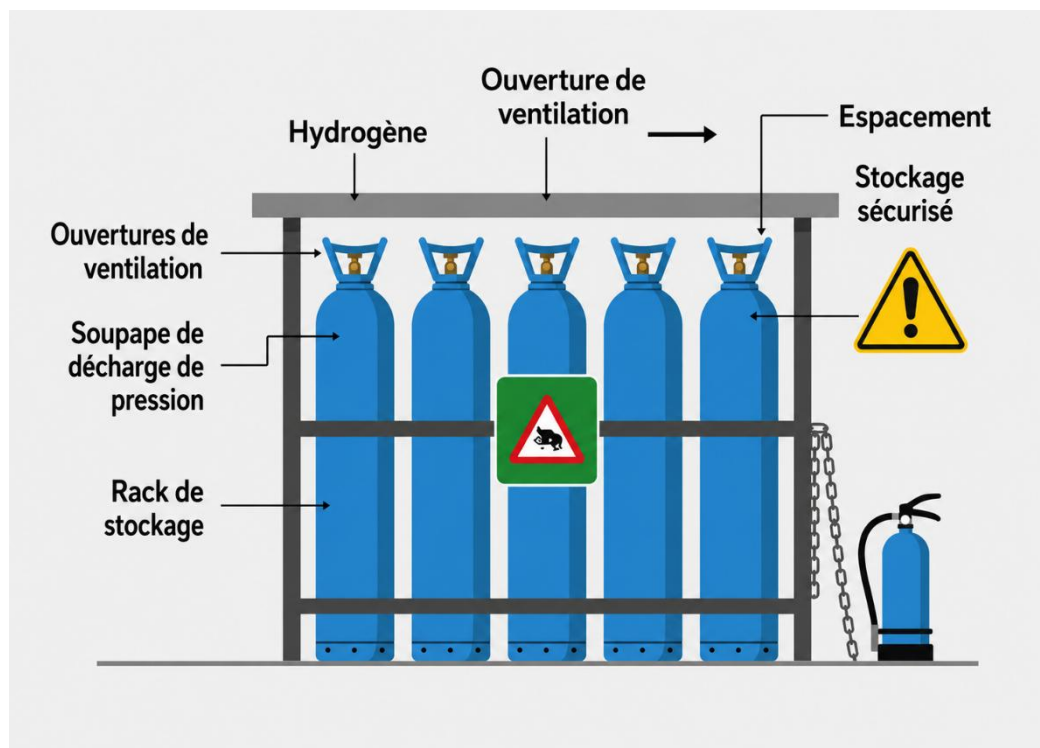
- **Incolore et inodore** : l'hydrogène ne peut être ni vu ni senti ; les fuites sont donc difficiles à détecter sans capteurs appropriés.
- **Forte inflammabilité** : l'hydrogène peut s'enflammer facilement et brûle rapidement. Il présente un large domaine d'inflammabilité, ce qui signifie qu'il peut prendre feu dans de nombreuses conditions.
- **Diffusion rapide** : l'hydrogène se diffuse rapidement dans l'air, ce qui peut constituer à la fois un avantage, en réduisant l'accumulation, et un risque, en favorisant la propagation rapide d'une fuite.

La compréhension de ces propriétés est importante, notamment lorsque les équipements de détection et les systèmes de sécurité sont limités.

5.3. Pratiques de stockage sûres

- **Conditions de stockage appropriées** : l'hydrogène doit être stocké dans des récipients robustes et correctement conçus, capables de résister à une haute pression ou à de très basses températures selon la méthode de stockage.
- **Ventilation** : les zones de stockage doivent être bien ventilées afin que toute fuite d'hydrogène puisse être évacuée de manière sûre vers l'air extérieur.
- **Utilisation de dispositifs de sécurité** : des dispositifs tels que les soupapes de décharge de pression, les détecteurs de fuites et les systèmes de surveillance sont indispensables à la prévention des accidents.
- **Manipulation et maintenance** : une inspection et une maintenance régulières des systèmes de stockage sont nécessaires à une exploitation sûre. Tout équipement endommagé ou défectueux doit être réparé ou remplacé immédiatement.

En Afrique de l'Ouest, des pratiques de stockage simples et claires sont importantes, notamment dans les zones rurales. La sensibilisation des communautés et une formation appropriée peuvent réduire les risques. La source indique que la figure 4.3 représente une installation appropriée de stockage de bouteilles d'hydrogène comportant des ouvertures de ventilation, une soupape de décharge de pression et des panneaux d'avertissement.



5.4. Pratiques de transport sûres

- **Manipulation sûre pendant le transport** : l'hydrogène doit être transporté dans des récipients sécurisés, correctement fermés et protégés contre les dommages.
- **Exigences de sécurité applicables aux véhicules** : les véhicules de transport doivent être clairement signalés et équipés du matériel de sécurité requis. Les réservoirs doivent être fermement arrimés afin d'éviter tout mouvement pendant le transport.
- **Formation du personnel** : les conducteurs et les manutentionnaires doivent être formés aux pratiques de transport sûres et savoir comment réagir en cas d'urgence.
- **Inspection et surveillance** : les systèmes de transport doivent être contrôlés régulièrement afin de détecter les fuites, les variations de pression et toute altération de l'intégrité structurelle.

Le transport routier étant courant en Afrique de l'Ouest, il est très important que les conducteurs et les travailleurs du secteur comprennent les règles de sécurité relatives à l'hydrogène afin de prévenir les accidents.

5.5. Intervention d'urgence et sensibilisation aux risques

- **Reconnaître les situations d'urgence** : les situations d'urgence liées à l'hydrogène peuvent comprendre des fuites, des incendies ou une défaillance d'équipement. Une détection précoce est essentielle afin de prévenir les incidents graves.
- **Mesures d'intervention d'urgence** : en cas de fuite ou d'incendie, la zone doit être évacuée immédiatement. Les systèmes d'urgence tels que les alarmes et les vannes automatiques d'arrêt doivent être activés.
- **Utilisation de systèmes de détection** : les capteurs d'hydrogène et les alarmes permettent de détecter rapidement les fuites et d'avertir les personnes avant que la situation ne devienne dangereuse.
- **Préparation et formation** : les travailleurs et les communautés doivent être formés aux procédures d'urgence, notamment aux plans d'évacuation et aux mesures d'intervention sûres.

Les systèmes d'intervention d'urgence peuvent être limités dans certaines zones ; une formation et une sensibilisation de base sont donc essentielles. Les communautés doivent connaître des mesures de sécurité simples pour se protéger.

5.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, vous avez appris que la sécurité est un aspect essentiel du stockage et du transport de l'hydrogène. L'hydrogène possède des propriétés particulières, notamment une forte inflammabilité, l'absence de couleur et d'odeur ainsi qu'une diffusion rapide, qui exigent une manipulation soignée. Les pratiques de stockage sûres comprennent une ventilation appropriée, l'utilisation de récipients robustes et des inspections régulières. Le transport sûr nécessite une manipulation sécurisée, du personnel formé et une signalisation appropriée. La préparation aux situations d'urgence est également essentielle ; elle comprend l'utilisation de systèmes de détection et de procédures d'intervention claires. En Afrique de l'Ouest, où les systèmes hydrogène sont encore en cours de développement, la sensibilisation à la sécurité et la mise en place de formations appropriées sont indispensables à une utilisation sûre et réussie de l'énergie hydrogène.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Pourquoi la sécurité de l'hydrogène est-elle importante ?
2. Nommez deux propriétés de l'hydrogène qui influent sur la sécurité.
3. Pourquoi l'hydrogène est-il difficile à détecter sans capteurs ?
4. À quoi sert la ventilation dans une zone de stockage d'hydrogène ?

5. Que faut-il faire en cas de fuite d'hydrogène ?
6. Comment la faible masse volumique de l'hydrogène influe-t-elle sur la sécurité ?
7. Pourquoi les soupapes de décharge de pression sont-elles importantes dans les systèmes de stockage ?
8. Expliquez pourquoi il est important que le personnel chargé du transport de l'hydrogène soit formé.
9. Quelles mesures de sécurité doivent être prises pendant le transport de l'hydrogène ?
10. Comment les communautés peuvent-elles se préparer aux situations d'urgence liées à l'hydrogène ?
11. Pourquoi les zones de stockage d'hydrogène doivent-elles être inspectées régulièrement ?
12. Quel rôle les capteurs d'hydrogène jouent-ils dans la sécurité ?
13. Pourquoi est-il important de signaler clairement les véhicules qui transportent de l'hydrogène ?
14. Quelles difficultés peuvent nuire à la sensibilisation à la sécurité de l'hydrogène dans les zones rurales d'Afrique de l'Ouest ?
15. Proposez des moyens d'améliorer les pratiques de sécurité de l'hydrogène dans votre communauté.

H2-B5 : INTRODUCTION AUX APPLICATIONS DE L'HYDROGÈNE

Durée du cours : 2,5 heures

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

- Expliquer les principes de fonctionnement des piles à combustible ;
- Identifier les principaux types de piles à combustible ;
- Décrire les applications de l'hydrogène dans les systèmes énergétiques.

INTRODUCTION AUX APPLICATIONS DE L'HYDROGÈNE

1.1. Qu'est-ce que l'hydrogène et pourquoi est-il important dans les systèmes énergétiques ?

L'hydrogène est l'élément le plus simple et le plus abondant de l'Univers. Il se présente sous forme gazeuse dans les conditions normales et n'existe pas à l'état libre en grandes quantités sur Terre ; il est plutôt présent dans des composés tels que l'eau (H_2O) et les hydrocarbures, comme le gaz naturel. Pour utiliser l'hydrogène comme combustible, il faut d'abord l'extraire de ces composés.

Dans les systèmes énergétiques, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique, et non comme une source d'énergie primaire. Il sert donc à stocker et à transporter de l'énergie produite à partir d'autres sources, telles que le solaire, l'éolien ou les combustibles fossiles. L'hydrogène revêt une importance particulière parce qu'il peut contribuer à relever des défis énergétiques majeurs, notamment le stockage de l'énergie renouvelable, la réduction de la pollution et l'approvisionnement énergétique des secteurs dans lesquels l'électricité seule ne suffit pas.

L'hydrogène peut servir à produire de l'électricité, à alimenter des véhicules et à soutenir des procédés industriels. Lorsqu'il est utilisé dans des piles à combustible, il produit de l'électricité dont l'eau est le seul coproduit, ce qui en fait une option propre lorsqu'il est produit à partir d'énergie renouvelable.

1.2. Propriétés essentielles de l'hydrogène

L'hydrogène possède plusieurs propriétés physiques et chimiques particulières qui le rendent utile, mais également difficile à employer comme vecteur énergétique.

- **Faible masse** : l'hydrogène est l'élément le plus léger. Il s'élève donc rapidement dans l'air, ce qui peut constituer un avantage en matière de sécurité dans les espaces ouverts, mais rend son stockage difficile.
- **Contenu énergétique massique élevé** : l'hydrogène contient une grande quantité d'énergie par unité de masse. Il présente ainsi un intérêt pour les transports et les usages industriels.
- **Faible densité** : parce qu'il est très léger, l'hydrogène occupe beaucoup de volume ; son stockage exige donc une compression ou une liquéfaction.
- **Très inflammable** : l'hydrogène brûle facilement et exige une manipulation prudente, une ventilation appropriée et des systèmes de sécurité.
- **Flamme invisible** : les flammes d'hydrogène sont presque invisibles, ce qui peut rendre la détection d'un incendie plus difficile.

Ces propriétés imposent l'utilisation de matériaux et de réservoirs spéciaux ainsi que de procédures de sécurité adaptées lors des travaux sur des systèmes à hydrogène.

Questions de réflexion

- À quels défis de sécurité les techniciens pourraient-ils être confrontés lorsqu'ils travaillent avec de l'hydrogène ?
- En matière d'espace et de sécurité, comment le stockage de l'hydrogène se compare-t-il à celui du gazole ?
- L'hydrogène pourrait-il remplacer les groupes électrogènes diesel dans votre communauté ? Pourquoi ou pourquoi pas ?
- Quels types de problèmes énergétiques locaux — coupures d'électricité ou coût des combustibles, par exemple — l'hydrogène pourrait-il contribuer à résoudre ?

1.3. Vue d'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène

La chaîne de valeur de l'hydrogène décrit le processus complet, depuis la production de l'hydrogène jusqu'à son utilisation à des fins énergétiques ou industrielles. Il est important que les techniciens comprennent cette chaîne, car chaque étape exige des équipements et des compétences différents. La figure 5.1 présente la chaîne de valeur du H₂ et ses principaux éléments : source d'énergie, production d'hydrogène, système de stockage, distribution et secteurs d'utilisation finale.

Étapes de la chaîne de valeur de l'hydrogène :

- 1. Production :** l'hydrogène est produit à partir d'eau, de gaz naturel ou d'autres matières au moyen de méthodes telles que l'électrolyse ou le vaporeformage du méthane.
- 2. Stockage :** l'hydrogène est stocké dans des réservoirs, des bouteilles ou des installations souterraines. Il est souvent comprimé ou liquéfié afin de réduire son volume.
- 3. Distribution :** l'hydrogène est transporté par gazoducs, camions ou bouteilles jusqu'au lieu où il est nécessaire.
- 4. Utilisation finale :** l'hydrogène est utilisé dans des piles à combustible pour produire de l'électricité, dans des véhicules ou dans des procédés industriels.

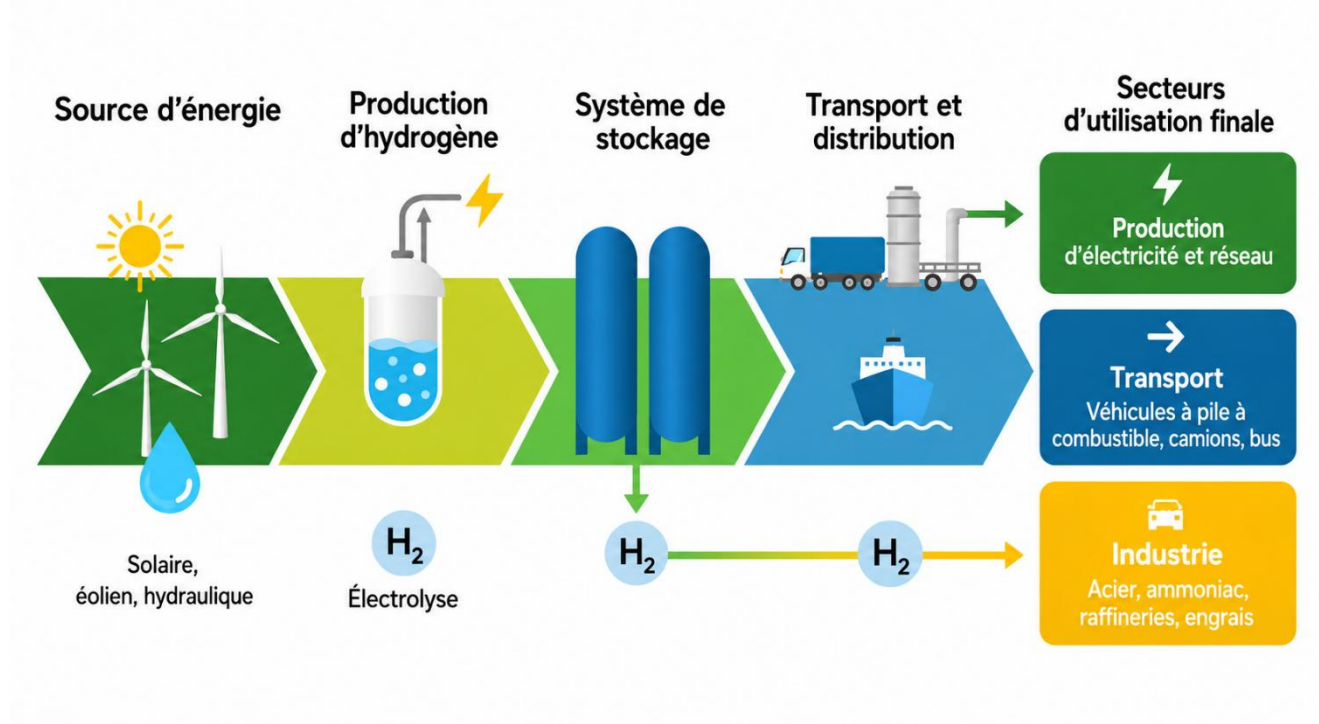


Figure 5.1. Chaîne de valeur énergétique de l'hydrogène

1.4. Avantages et limites de l'hydrogène comme vecteur énergétique

L'hydrogène offre de nombreux avantages, mais présente également d'importantes difficultés qu'il convient de comprendre.

Avantages

- **Option énergétique propre :** lorsqu'il est produit à partir de sources renouvelables, l'hydrogène ne génère aucune émission de carbone pendant son utilisation.
- **Stockage d'énergie :** il peut stocker de l'énergie pendant de longues périodes, contrairement aux batteries, qui se déchargent au fil du temps.
- **Polyvalence :** l'hydrogène peut être utilisé pour la production d'électricité, les transports et l'industrie.

- **Soutien aux énergies renouvelables** : il contribue à équilibrer la production solaire et éolienne en stockant l'énergie excédentaire.

Limites

- **Difficultés de stockage et de transport** : l'hydrogène nécessite des réservoirs haute pression ou des systèmes de refroidissement.
- **Coûts élevés** : la production et les infrastructures peuvent être coûteuses, en particulier pour l'hydrogène vert.
- **Risques de sécurité** : il est très inflammable et exige des procédures de manipulation strictes.
- **Infrastructures limitées** : de nombreuses régions, notamment certaines parties de l'Afrique de l'Ouest, ne disposent pas de systèmes ni de réseaux d'approvisionnement en hydrogène.

Questions de réflexion

- Comment le stockage de l'hydrogène se compare-t-il à celui du gazole dans votre communauté ?
- Quels sont les principaux obstacles à l'utilisation locale de l'hydrogène ?
- Quel système est aujourd'hui le plus facile à réparer : un système à hydrogène ou un groupe électrogène diesel ? Pourquoi ?

1.5. Résumé du chapitre

L'hydrogène est un vecteur énergétique polyvalent capable de stocker et de fournir de l'énergie dans de multiples secteurs. Son contenu énergétique massique est élevé, mais sa faible densité complique son stockage et son transport. La chaîne de valeur de l'hydrogène comprend la production, le stockage, la distribution et l'utilisation finale. Bien que l'hydrogène présente un potentiel d'énergie propre, surtout lorsqu'il est produit à partir de sources renouvelables, il exige également une manipulation prudente et le développement d'infrastructures.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Qu'entend-on par « hydrogène comme vecteur énergétique » ?
2. Citez deux propriétés essentielles de l'hydrogène.
3. Quelles sont les principales étapes de la chaîne de valeur de l'hydrogène ?
4. Pourquoi l'hydrogène est-il difficile à stocker ?
5. Citez un avantage et une limite de l'énergie hydrogène.

MÉTHODES DE PRODUCTION ET D'APPROVISIONNEMENT EN HYDROGÈNE

2.1. Principales méthodes de production de l'hydrogène (SMR, électrolyse, gazéification)

L'hydrogène peut être produit selon différentes méthodes en fonction des ressources disponibles, du coût et des considérations environnementales. Les méthodes les plus courantes comprennent :

- **Vaporeformage du méthane (SMR, *Steam Methane Reforming*)** : il s'agit de la méthode la plus largement utilisée à l'heure actuelle. Elle utilise du gaz naturel — du méthane — et de la vapeur pour produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone (CO₂). Elle est relativement peu coûteuse, mais génère des gaz à effet de serre.
- **Électrolyse** : cette méthode utilise de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Lorsqu'elle est alimentée par de l'énergie renouvelable — solaire ou éolienne —, elle produit de l'hydrogène vert, propre et durable.
- **Gazéification** : au cours de ce procédé, le charbon ou la biomasse est converti à haute température en hydrogène et en d'autres gaz. La gazéification du charbon génère des émissions importantes, tandis que celle de la biomasse peut être plus propre.

Chaque méthode implique des compromis entre le coût, l'incidence environnementale et la complexité technique.

2.2. Production d'hydrogène renouvelable et non renouvelable

La production d'hydrogène peut être classée en fonction de la source d'énergie utilisée :

- **Hydrogène non renouvelable** : produit à partir de combustibles fossiles tels que le gaz naturel et le charbon. L'hydrogène gris et l'hydrogène brun en sont des exemples. Ces méthodes sont moins coûteuses, mais contribuent à la pollution et au changement climatique.
- **Hydrogène renouvelable** : produit au moyen de sources d'énergie renouvelable telles que le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité. L'électrolyse alimentée par des énergies renouvelables produit de l'hydrogène vert, dont l'incidence environnementale est minimale.

Le choix entre ces méthodes dépend du coût, de la disponibilité des ressources et des priorités environnementales.

Questions de réflexion

- Quelle méthode de production d'hydrogène est aujourd'hui la plus pratique dans votre région ? Pourquoi ?
- Quelles difficultés les techniciens rencontreraient-ils pour entretenir localement des systèmes de SMR ou d'électrolyse ?
- Votre région dispose-t-elle d'un accès plus important aux énergies renouvelables ou aux combustibles fossiles ?
- Qu'est-ce qui rendrait l'hydrogène renouvelable plus attrayant à l'échelle locale ?

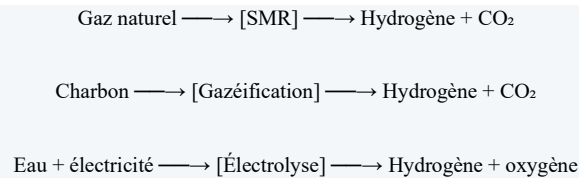
2.3. Principaux intrants (eau, électricité, gaz naturel, charbon)

La production d'hydrogène exige des intrants particuliers, qui dépendent de la méthode employée :

- **Eau** : indispensable à l'électrolyse. Une eau propre améliore l'efficacité et la durée de vie du système.
- **Électricité** : nécessaire à l'électrolyse. Son coût et son origine influent fortement sur le coût de l'hydrogène.
- **Gaz naturel** : utilisé dans le SMR. Il est largement disponible dans certaines régions, mais contribue aux émissions.
- **Charbon ou biomasse** : utilisé lors de la gazéification. Le charbon est polluant, tandis que la biomasse peut constituer une solution de remplacement plus propre si elle est gérée durablement.

La disponibilité et le coût de ces intrants influencent fortement la méthode de production la mieux adaptée à une région donnée.

La figure 2.1 présente les voies de production du H₂ et leurs principaux éléments, notamment les productions d'origine fossile et renouvelable ainsi que les intrants et les produits. Les procédés de ces différentes voies, avec leurs intrants et leurs produits, peuvent être représentés comme suit :



Questions de réflexion

- Quels intrants sont facilement disponibles dans votre région ?
- Comment le coût de l'électricité influe-t-il sur la production d'hydrogène dans votre région ?

2.4. Infrastructures de base pour l'approvisionnement en hydrogène

Une fois produit, l'hydrogène doit être stocké, transporté et livré en toute sécurité. Cela nécessite des infrastructures spécialisées :

- **Systèmes de stockage** : l'hydrogène est stocké dans des réservoirs haute pression, des bouteilles ou des installations de stockage souterrain.
- **Systèmes de transport** : selon la distance et l'échelle, l'hydrogène peut être transporté par gazoducs, camions ou bouteilles.
- **Réseaux de distribution** : des infrastructures sont nécessaires pour livrer l'hydrogène aux utilisateurs, par exemple aux industries, aux stations de ravitaillement ou aux microréseaux.
- **Systèmes de sécurité** : ils comprennent la détection des fuites, la ventilation et les systèmes de régulation de la pression.

Le développement des infrastructures constitue l'un des principaux défis de l'adoption de l'hydrogène, en particulier dans les régions en développement.

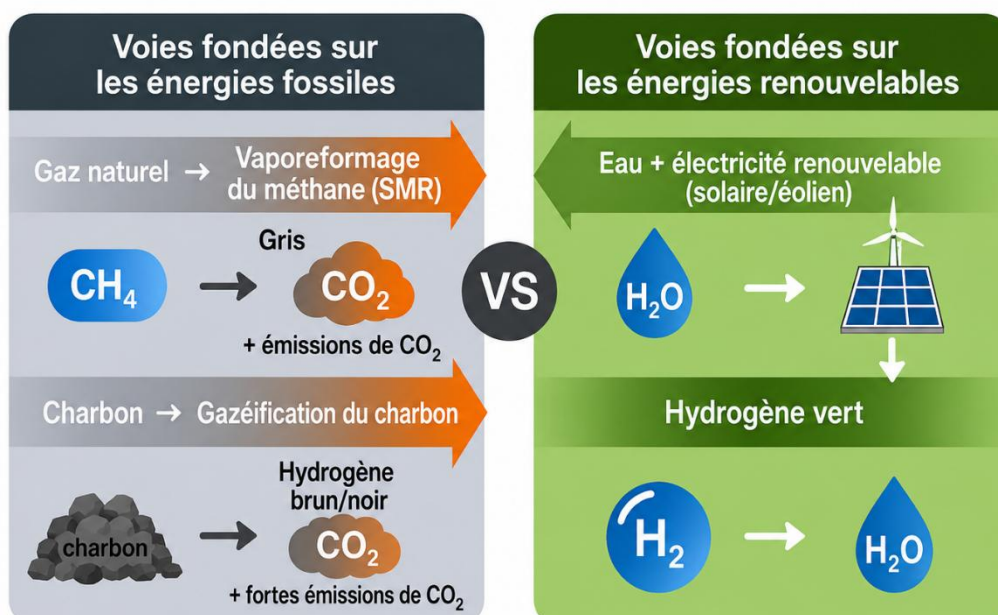


Figure 2.1. Schéma explicatif des voies de production de l'hydrogène

Dans des régions comme le Sénégal, un parc éolien côtier alimentant un électrolyseur peut produire de l'hydrogène. Celui-ci peut ensuite être stocké et fourni à une installation voisine de transformation du poisson afin de lui apporter une énergie propre pour la réfrigération et les opérations.

2.5. Résumé du chapitre

L'hydrogène peut être produit selon plusieurs méthodes, notamment le vaporeformage du méthane, l'électrolyse et la gazéification. Ces méthodes diffèrent par leur coût, leur incidence environnementale et les intrants nécessaires, tels que l'eau, l'électricité, le gaz naturel ou le charbon. La production d'hydrogène renouvelable est plus propre, mais reste actuellement plus coûteuse dans de nombreuses régions. Le développement d'infrastructures d'approvisionnement — notamment les systèmes de stockage, de transport et de distribution — est indispensable à l'expansion de l'utilisation de l'hydrogène.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Nommez deux méthodes de production de l'hydrogène.
2. Quels intrants sont nécessaires à l'électrolyse ?
3. Quelle est la différence entre l'hydrogène renouvelable et l'hydrogène non renouvelable ?
4. Pourquoi les infrastructures sont-elles importantes pour l'approvisionnement en hydrogène ?
5. Citez un inconvénient de la production d'hydrogène à partir de ressources fossiles.

H2-B5-3

L'HYDROGÈNE DANS LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ, LES TRANSPORTS ET L'INDUSTRIE

3.1. L'hydrogène dans la production d'électricité (piles à combustible, turbines)

L'hydrogène peut servir à produire de l'électricité de deux manières principales : au moyen de piles à combustible et de turbines à hydrogène.

- **Piles à combustible** : ces dispositifs convertissent directement l'hydrogène en électricité par une réaction électrochimique. Leur rendement est élevé et leur seul coproduit est l'eau. Les piles à combustible conviennent aux systèmes de petite taille et à l'alimentation électrique de secours.
- **Turbines à hydrogène** : l'hydrogène peut être brûlé dans des turbines afin de produire de l'électricité, de manière similaire au gaz naturel. Cette méthode convient à la production d'électricité à grande échelle.

L'hydrogène est particulièrement utile pour l'alimentation électrique de secours et pour soutenir les systèmes d'énergie renouvelable lorsque l'énergie solaire ou éolienne n'est pas disponible.

Questions de réflexion

- Des piles à combustible à hydrogène pourraient-elles remplacer les groupes électrogènes sur votre lieu de travail ? Pourquoi ou pourquoi pas ?
- Quel système serait le plus facile à entretenir localement : une pile à combustible ou un groupe électrogène diesel ?

3.2. L'hydrogène dans les transports (voitures, autobus, camions)

Dans les transports, l'hydrogène est principalement utilisé dans des véhicules à pile à combustible (FCV, *Fuel Cell Vehicles*). Ces véhicules utilisent l'hydrogène pour produire l'électricité qui alimente un moteur électrique.

• Les applications comprennent :

- les voitures ;
- les autobus ;
- les camions ;
- les trains, dans certaines régions.

Les véhicules à hydrogène sont silencieux, efficaces et ne produisent aucune émission nocive. Ils nécessitent toutefois des stations de ravitaillement spécialisées et des techniciens formés.

Questions de réflexion

- Les véhicules à hydrogène seraient-ils aujourd'hui utilisables dans votre région ? Pourquoi ou pourquoi pas ?
- Quelles difficultés l'entretien d'autobus à hydrogène pourrait-il présenter par rapport à celui d'autobus diesel ?

3.3. L'hydrogène dans l'industrie

L'hydrogène joue déjà un rôle important dans plusieurs secteurs industriels et prend une place croissante dans la transition vers des procédés de production plus propres. Dans la production d'engrais, il constitue une matière première essentielle à la synthèse de l'ammoniac selon le procédé Haber-Bosch. L'ammoniac est un composant fondamental des engrais azotés ; l'hydrogène est donc indispensable à la productivité agricole mondiale et à la sécurité alimentaire. Dans l'industrie du raffinage du pétrole, l'hydrogène est largement utilisé dans des procédés tels que l'hydrocraquage et l'hydrotraitement, où il contribue à éliminer du pétrole brut des impuretés comme le soufre, l'azote et les métaux lourds, améliorant ainsi la

qualité des combustibles et assurant le respect des normes environnementales. Par ailleurs, dans la production d'acier, l'hydrogène apparaît comme une solution de remplacement prometteuse des méthodes traditionnelles à forte intensité de carbone. Il peut être utilisé comme agent réducteur à la place du coke ou du charbon lors du traitement du minerai de fer, ce qui réduit considérablement les émissions de dioxyde de carbone. Cette évolution vers une sidérurgie fondée sur l'hydrogène constitue une étape essentielle de la décarbonation de l'un des secteurs industriels les plus énergivores et les plus polluants.

Ces applications sont importantes parce qu'elles consomment de grandes quantités d'énergie et offrent des possibilités de réduire la pollution.

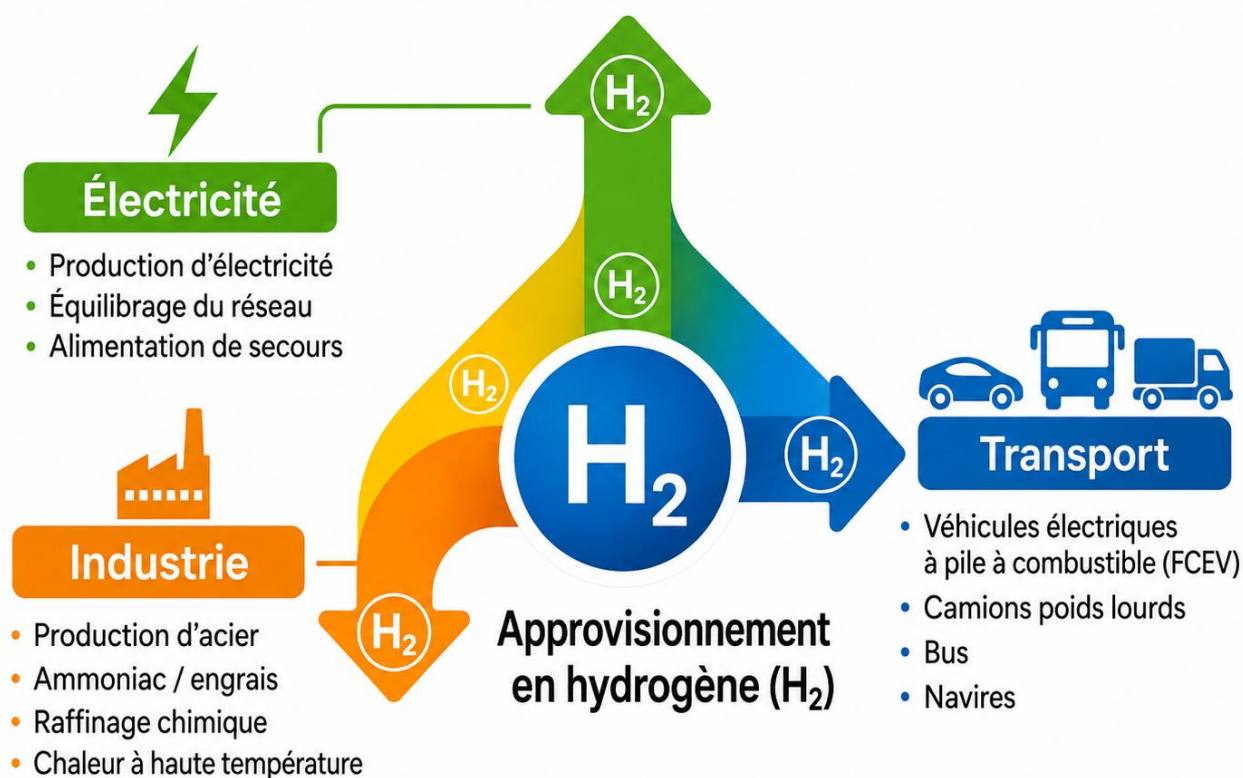


Figure 3.1. Applications de l'hydrogène dans les trois principaux secteurs d'utilisation

Questions de réflexion

- Quelles industries de votre région pourraient tirer parti de l'utilisation de l'hydrogène ?
- Comment l'hydrogène pourrait-il réduire la pollution dans les industries locales ?

3.4. Avantages et limites dans les différents secteurs

Avantages

- Réduit la pollution atmosphérique et les émissions de carbone ;
- Peut remplacer les combustibles fossiles dans les secteurs difficiles à décarboner ;
- Offre une utilisation souple dans l'énergie, les transports et l'industrie.

Limites

- Coût élevé des technologies de l'hydrogène ;
- Infrastructures limitées — stations de ravitaillement et gazoducs ;
- Besoin de techniciens qualifiés et de systèmes de maintenance.

Comprendre ces avantages et ces limites aide à déterminer les domaines dans lesquels l'hydrogène peut être utilisé efficacement.

Questions de réflexion

- Quel secteur — énergie, transports ou industrie — est le plus adapté à l'hydrogène dans votre région ?
- De quelles compétences les techniciens auraient-ils besoin pour assurer le fonctionnement des systèmes à hydrogène ?

Une ville située dans la région de Lagos peut mettre en service des autobus à hydrogène afin de réduire la consommation de gazole et d'améliorer la qualité de l'air en milieu urbain.

3.5. Résumé du chapitre

L'hydrogène peut être utilisé dans de multiples secteurs, notamment la production d'électricité, les transports et l'industrie. Il produit de l'électricité au moyen de piles à combustible et de turbines, alimente des véhicules et soutient des procédés industriels essentiels. Ces applications offrent des solutions de remplacement plus propres aux combustibles fossiles. Toutefois, des difficultés liées au coût, aux infrastructures et aux capacités techniques doivent être surmontées pour permettre une adoption généralisée.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Comment l'hydrogène est-il utilisé pour produire de l'électricité ?
2. Citez une application de l'hydrogène dans les transports.
3. Quelles industries utilisent couramment l'hydrogène ?
4. Citez un avantage de l'hydrogène dans les transports.
5. Quels facteurs limitent l'adoption de l'hydrogène dans les différents secteurs ?

L'HYDROGÈNE POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ET LES MICRORÉSEAUX

4.1. Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'énergie

L'hydrogène permet de stocker de l'énergie pendant de longues périodes, ce qui le rend utile pour équilibrer l'offre et la demande d'énergie. Lorsqu'un excédent d'électricité est disponible — par exemple celui que produisent les panneaux solaires pendant la journée —, il peut servir à produire de l'hydrogène par électrolyse. L'hydrogène peut ensuite être stocké et utilisé ultérieurement pour produire de l'électricité.

L'hydrogène est ainsi particulièrement précieux dans les zones où l'alimentation électrique manque de fiabilité ou qui dépendent fortement des énergies renouvelables.

Questions de réflexion

- Comment l'hydrogène pourrait-il contribuer à réduire les coupures d'électricité dans votre communauté ?
- Quels sont les avantages du stockage de l'énergie par rapport à son utilisation immédiate ?

4.2. Comparaison avec les batteries

Le stockage par hydrogène et les batteries permettent tous deux de stocker de l'énergie, mais présentent des atouts différents :

- **Batteries :**
 - adaptées au stockage de courte durée ;
 - réponse rapide ;
 - capacité de stockage limitée.
- **Hydrogène :**
 - adapté au stockage de longue durée et à grande échelle ;
 - permet de stocker de l'énergie pendant des jours ou des mois ;
 - exige des systèmes plus complexes.

Le choix dépend de l'application et de la durée de stockage requise.

Questions de réflexion

- Préfereriez-vous assurer la maintenance de batteries ou de systèmes à hydrogène ? Pourquoi ?
- Quel système est le plus facile à réparer localement ?

4.3. Microréseaux fondés sur l'hydrogène

Un microréseau est un petit système énergétique local qui peut fonctionner indépendamment du réseau principal. L'hydrogène peut être intégré aux microréseaux afin d'en améliorer la fiabilité. La figure 4.1 représente le stockage d'hydrogène dans un microréseau renouvelable, avec des éléments essentiels tels qu'une source d'énergie renouvelable, un électrolyseur, un stockage d'hydrogène, une pile à combustible et une alimentation électrique.

Dans un microréseau fondé sur l'hydrogène :

- l'énergie renouvelable produit de l'électricité ;
- l'énergie excédentaire permet de produire de l'hydrogène ;
- l'hydrogène est stocké ;

- une pile à combustible reconvertis, en fonction des besoins, l'hydrogène en électricité.

Cette configuration assure une alimentation électrique continue, même lorsque les sources renouvelables ne sont pas disponibles.

Questions de réflexion

- Des microréseaux à hydrogène pourraient-ils fonctionner dans les communautés rurales de votre région ?
- Quelles difficultés pourraient survenir lors de la maintenance de tels systèmes ?

4.4. Stockage d'énergie de longue durée et saisonnier

L'hydrogène est particulièrement utile pour stocker de l'énergie pendant de longues périodes :

- **Stockage de longue durée** : l'énergie peut être stockée pendant des jours ou des semaines.
- **Stockage saisonnier** : l'énergie excédentaire d'une saison — par exemple la saison ensoleillée — peut être stockée et utilisée pendant une autre saison.

L'hydrogène joue ainsi un rôle important dans la stabilisation des systèmes d'énergie renouvelable et la continuité de l'approvisionnement énergétique.

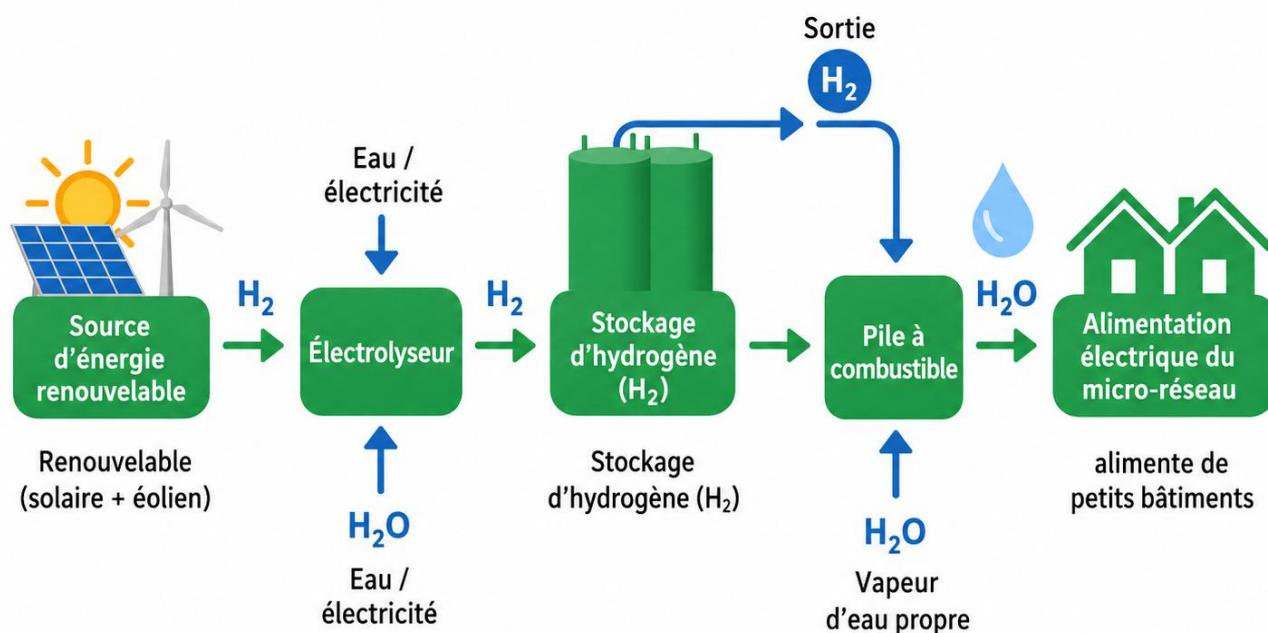
Questions de réflexion

- Quels avantages le stockage saisonnier de l'énergie pourrait-il apporter à l'agriculture ou aux entreprises locales ?
- Quelles infrastructures seraient nécessaires pour assurer le stockage de longue durée de l'hydrogène ?

Figure 4.1. Stockage d'hydrogène dans un microréseau renouvelable

Éléments essentiels :

- source d'énergie renouvelable ;
- électrolyseur ;
- stockage d'hydrogène ;
- pile à combustible ;
- alimentation électrique.



Une communauté rurale du Mali peut installer un microréseau solaire doté d'un stockage d'hydrogène. Pendant la journée, les panneaux solaires produisent de l'électricité et de l'hydrogène. La nuit, l'hydrogène stocké peut servir à produire de l'électricité pour les logements et les petites entreprises.

4.5. Résumé du chapitre

L'hydrogène constitue une solution efficace pour stocker l'énergie, notamment dans les systèmes d'énergie renouvelable. Il convient au stockage de longue durée et à grande échelle, contrairement aux batteries, mieux adaptées aux utilisations de courte durée. L'hydrogène peut être intégré aux microréseaux afin de fournir une électricité fiable dans les zones hors réseau. Il présente ainsi une grande valeur pour les communautés rurales et isolées.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Pourquoi l'hydrogène est-il utile pour le stockage de l'énergie ?
2. En quoi le stockage de l'hydrogène diffère-t-il du stockage par batteries ?
3. Qu'est-ce qu'un microréseau ?
4. Quel rôle une pile à combustible joue-t-elle dans un système à hydrogène ?
5. Pourquoi l'hydrogène convient-il au stockage de longue durée ?