

H2-A1

Conception et modélisation des systèmes d'électrolyse et technologies de production d'hydrogène

Présentation du cours

Ce cours permet aux apprenants de niveau avancé de l'enseignement et de la formation techniques et professionnels (EFTP) d'acquérir des compétences pratiques et analytiques en matière de production d'hydrogène à l'aide des technologies d'électrolyse. Il porte sur les principes de l'électrolyse, la conception des systèmes, l'évaluation des performances, l'intégration des énergies renouvelables, l'évaluation technico-économique et les applications industrielles. Le cours associe apprentissage théorique, activités pratiques en laboratoire, exercices de simulation et applications fondées sur des projets.

Acquis d'apprentissage du cours

- Expliquer les principes de fonctionnement des systèmes d'électrolyse de l'hydrogène.
- Comparer les différentes technologies d'électrolyse et leurs applications.
- Concevoir et dimensionner des systèmes d'électrolyse destinés à la production d'hydrogène.
- Analyser les performances et le rendement des systèmes d'électrolyse.
- Intégrer des systèmes d'électrolyse à des sources d'énergie renouvelable.
- Réaliser une évaluation technico-économique de base des systèmes de production d'hydrogène.
- Appliquer les normes de sécurité industrielles et les procédures d'exploitation.

H2-A1-1

Fondamentaux de l'énergie hydrogène et des technologies d'électrolyse

Durée estimée : 22 heures au total

- *Théorie / salle de classe : 8 heures*
- *Travaux pratiques / atelier / simulation : 10 heures*
- *Travail autonome et évaluation : 4 heures*

Objectifs d'apprentissage

- Identifier les filières de production d'hydrogène vert, bleu et gris et recommander la filière la plus adaptée à un site industriel donné en fonction des ressources renouvelables locales et des objectifs de réduction des émissions de carbone.
- Calculer le courant électrique théorique et réel nécessaire pour produire une quantité journalière spécifiée d'hydrogène en appliquant les lois de Faraday.
- Sélectionner la technologie d'électrolyse la plus appropriée (AEL, PEMEL, SOEC ou AEM) pour une application réelle et justifier ce choix à partir des paramètres de fonctionnement et des considérations de coût.

- Interpréter la fiche technique et la courbe de polarisation d'un électrolyseur fournies par un fabricant afin de déterminer les limites de fonctionnement sûres (densité de courant, température, pression).
- Dessiner et légender la structure interne de base d'une cellule d'électrolyse alcaline et d'une cellule d'électrolyse PEM, en identifiant les composants critiques qui doivent faire l'objet d'inspections régulières.
- Effectuer une comparaison de base des technologies d'électrolyse et estimer le dimensionnement de l'empilement (stack) d'une petite installation pilote (50 à 500 Nm³/h).
- Énumérer les principaux risques de sécurité et préparer une liste de contrôle de sécurité de base avant démarrage d'un système d'électrolyse.
- Expliquer la place de l'électrolyse dans une installation de production d'hydrogène renouvelable et identifier les points d'intégration avec les sources d'électricité renouvelable.

Terminologie clé

Densité de courant (A/cm²) : Intensité en ampères par unité de surface active de l'électrode ; elle détermine le taux de production et la génération de chaleur.

Rendement faradique : Pourcentage des électrons qui contribuent effectivement à la production d'hydrogène (valeur typique : 95 à 99 %).

Tension de cellule : Tension aux bornes d'une cellule (valeur pratique : 1,6 à 2,2 V).

Empilement (stack) : Ensemble de plusieurs cellules connectées en série.

BOP / BoP (Balance of Plant) : Ensemble des systèmes auxiliaires : traitement de l'eau, alimentation électrique, séparation des gaz et refroidissement.

Redresseur : Équipement qui convertit le courant alternatif (CA) en courant continu (CC) pour l'électrolyseur.

Courbe de polarisation : Graphique représentant la tension en fonction de la densité de courant ; il est utilisé pour le diagnostic des performances.

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) : Vecteur organique liquide d'hydrogène ; méthode émergente de stockage de l'hydrogène.

Consommation énergétique spécifique : Consommation exprimée en kWh par Nm³ ou par kg de H₂ ; indicateur clé de performance.

1.1. Économie de l'hydrogène et transition énergétique

Le monde connaît actuellement une transformation majeure de la manière dont l'énergie est produite, stockée, transportée et utilisée. Cette transformation est communément appelée transition énergétique. Elle correspond au passage progressif de systèmes énergétiques fondés sur les combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, vers des technologies énergétiques plus propres, plus durables et à faibles émissions de carbone. L'économie de l'hydrogène constitue l'une des évolutions technologiques importantes qui accompagnent cette transition.

L'hydrogène est de plus en plus considéré comme un vecteur énergétique stratégique, car il peut stocker de l'énergie, transporter de l'énergie sur de longues distances et fournir un combustible à des secteurs difficiles à électrifier directement, notamment les industries lourdes, l'aviation, le transport maritime, la production

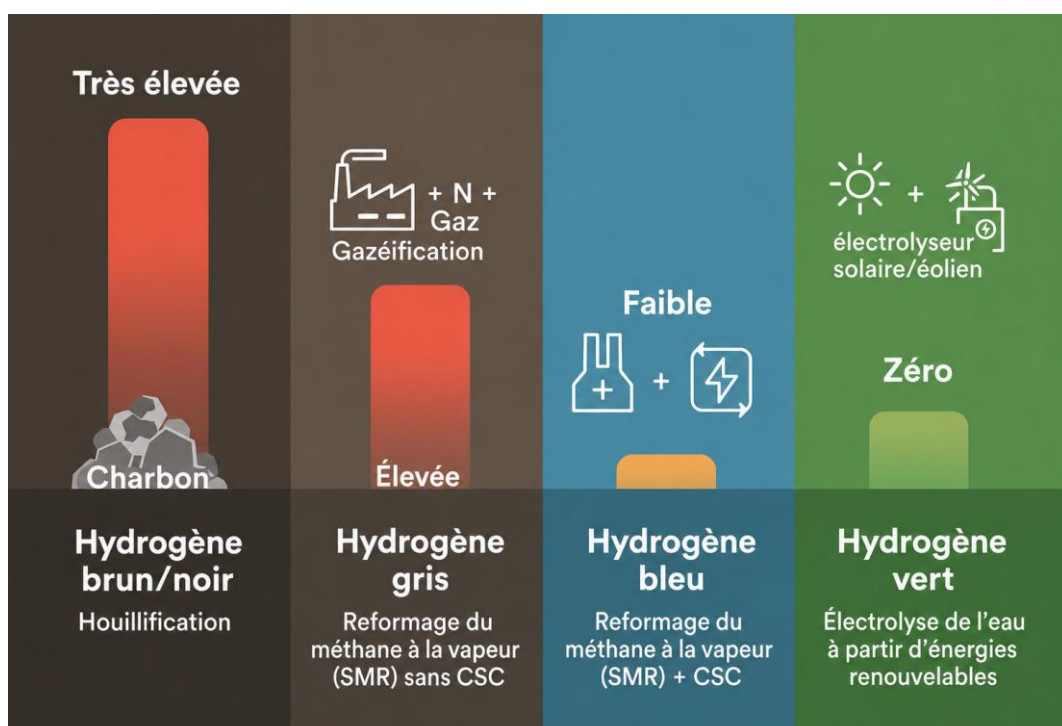
d'engrais et le transport longue distance. Toutefois, l'impact environnemental de l'hydrogène dépend fortement de son mode de production. Les ingénieurs et les techniciens doivent donc comprendre clairement les différentes filières de production de l'hydrogène avant de prendre des décisions techniques, économiques ou liées à la sécurité.

L'économie de l'hydrogène est un système énergétique dans lequel l'hydrogène est produit, distribué, stocké et utilisé à grande échelle comme vecteur d'énergie pour les procédés industriels, les transports, la production d'électricité et le stockage de l'énergie. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire comme le charbon ou le rayonnement solaire. C'est un vecteur énergétique : de l'énergie doit d'abord être utilisée pour le produire. Une fois produit, l'hydrogène peut stocker cette énergie puis la restituer ultérieurement par combustion ou au moyen de piles à combustible.

L'hydrogène peut jouer un rôle important dans les systèmes énergétiques modernes. Il peut être utilisé pour :

- la production d'électricité ;
- les véhicules électriques à pile à combustible ;
- le chauffage industriel ;
- la fabrication de l'acier ;
- la production de produits chimiques et d'engrais ;
- le stockage de longue durée de l'énergie renouvelable ;
- les systèmes d'alimentation de secours ;
- les carburants pour le transport maritime et l'aviation.

L'hydrogène est particulièrement intéressant parce qu'il peut faciliter l'intégration au réseau électrique de sources d'énergie renouvelable intermittentes telles que le solaire et l'éolien. La figure 1.1 présente différentes filières de production d'hydrogène et illustre, de manière qualitative, le niveau d'émissions de carbone associé à chacune d'elles.



1.2. Fondamentaux de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est l'une des technologies les plus importantes utilisées dans les systèmes modernes de production d'hydrogène vert. Dans ce procédé, de l'énergie électrique est utilisée pour dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène gazeux. Lorsque l'électricité provient de sources renouvelables telles que le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité, l'hydrogène produit est appelé hydrogène vert.

L'électrolyse est largement utilisée dans :

- les stations de ravitaillement en hydrogène ;
- les systèmes de stockage d'énergie renouvelable ;
- les installations industrielles de production d'hydrogène ;
- les systèmes Power-to-Gas (conversion de l'électricité en gaz) ;
- les applications énergétiques utilisant des piles à combustible.

La compréhension des principes de fonctionnement de l'électrolyse est essentielle, car les techniciens et les ingénieurs travaillant dans des installations de production d'hydrogène doivent surveiller en permanence le rendement de production, les performances électriques, la pureté des gaz et les conditions de sécurité.

1.2.1. Principe de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à faire circuler un courant continu (CC) dans l'eau au moyen d'un électrolyseur.

L'électrolyseur comprend :

- une anode (électrode positive) ;
- une cathode (électrode négative) ;
- un électrolyte ou une membrane ;
- une alimentation externe en courant continu (CC).

Pendant le fonctionnement :

- l'hydrogène gazeux est produit à la cathode ;
- l'oxygène gazeux est produit à l'anode.

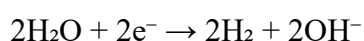
Réaction globale d'électrolyse :



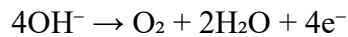
Cette réaction nécessite un apport d'énergie électrique, car les molécules d'eau sont chimiquement stables et ne se dissocient pas spontanément dans les conditions normales.

1.2.2. Réactions électrochimiques dans l'électrolyseur

Réaction à la cathode (production d'hydrogène) : à la cathode, l'eau capte des électrons et produit de l'hydrogène gazeux.



Réaction à l'anode (production d'oxygène) : à l'anode, les ions hydroxyde cèdent des électrons et forment de l'oxygène gazeux.



Ces réactions électrochimiques constituent la base de la production d'hydrogène dans les électrolyseurs alcalins et dans de nombreux systèmes industriels d'électrolyse.

1.2.3. Types d'électrolyseurs d'eau

Les installations modernes de production d'hydrogène utilisent différents types d'électrolyseurs selon le coût, le rendement, la température de fonctionnement et les exigences de l'application.

A. Électrolyseur alcalin

- Utilise un électrolyte alcalin liquide, par exemple de l'hydroxyde de potassium (KOH).
- Technologie mature et largement utilisée.
- Coût plus faible.
- Adapté aux grandes installations industrielles.

B. Électrolyseur PEM (membrane échangeuse de protons)

- Utilise une membrane polymère solide.
- Réagit plus rapidement aux fluctuations de la production d'électricité renouvelable.
- Produit de l'hydrogène de grande pureté.
- Coût d'investissement plus élevé.

C. Électrolyseur à oxyde solide

- Fonctionne à très haute température.
- Présente un potentiel de rendement élevé.
- Se situe principalement au stade du développement avancé et de la recherche.

1.2.4. Lois de Faraday appliquées à la production d'hydrogène

L'un des concepts d'ingénierie les plus importants en électrolyse est la loi de Faraday de l'électrolyse. Les lois de Faraday décrivent la relation entre :

- le courant électrique fourni à l'électrolyseur ;
- la durée de fonctionnement ;
- la quantité d'hydrogène produite.

Dans les installations industrielles réelles, les lois de Faraday sont utilisées quotidiennement pour :

- vérifier les performances de production d'hydrogène ;
- surveiller le rendement du système ;
- détecter des conditions de fonctionnement anormales ;
- concevoir et dimensionner de nouvelles installations de production d'hydrogène ;

- estimer les besoins en énergie électrique ;
- optimiser l'exploitation de l'installation.

Les techniciens comparent fréquemment la production réelle d'hydrogène à la valeur théorique prévue par la loi de Faraday. Autrement dit, les lois de Faraday sont utilisées au quotidien pour vérifier si un système produit la quantité d'hydrogène attendue ou pour dimensionner de nouvelles installations.

Débit de production d'hydrogène (QH₂) :

$$QH_2 \approx I \times N_{\text{cells}} \times \eta_F \times 0,000418$$

où I est le courant (A), N_{cells} le nombre de cellules de l'électrolyseur, η_F le rendement faradique et 0,000418 la constante de conversion.

Activité

Un empilement PEM de 500 kW fonctionne à 1 000 A par cellule, avec 120 cellules connectées en série et un rendement faradique de 97 %. Calculer la production journalière de H₂.

Qu'est-ce que le rendement faradique ?

Le rendement faradique indique avec quelle efficacité la charge électrique est convertie en production d'hydrogène.

Dans un système idéal :

- tout le courant électrique contribuerait à produire de l'hydrogène ;
- le rendement faradique serait de 100 %.

Dans les systèmes réels, des pertes se produisent cependant en raison de :

- la résistance interne ;
- le passage croisé des gaz (gas crossover) ;
- la génération de chaleur ;
- les réactions secondaires ;
- les courants de fuite.

Le rendement faradique réel est donc généralement légèrement inférieur à 100 %.

Importance pratique

Un faible rendement faradique peut indiquer :

- un endommagement de la membrane ;
- un mauvais état des électrodes ;
- des pertes électriques ;
- une fuite de gaz ;
- un dysfonctionnement opérationnel.

La surveillance du rendement faradique constitue donc une tâche importante de maintenance et de dépannage dans les installations de production d'hydrogène.

- Les systèmes commerciaux sont généralement caractérisés en Nm^3/h ou en kg/h . Conversion rapide à connaître : $1 \text{ kg H}_2 \approx 11,1 \text{ Nm}^3$.

1.3. Types de technologies d'électrolyse

Les technologies d'électrolyse sont classées en fonction du matériau de l'électrolyte, de la température de fonctionnement, du rendement, du coût et du domaine d'application. Pour les techniciens et les concepteurs de systèmes, le choix de la technologie d'électrolyse appropriée est important lors :

- des études de faisabilité ;
- de l'extension d'une installation ;
- du remplacement d'équipements ;
- de l'intégration des énergies renouvelables ;
- de la conception de stations de ravitaillement en hydrogène.

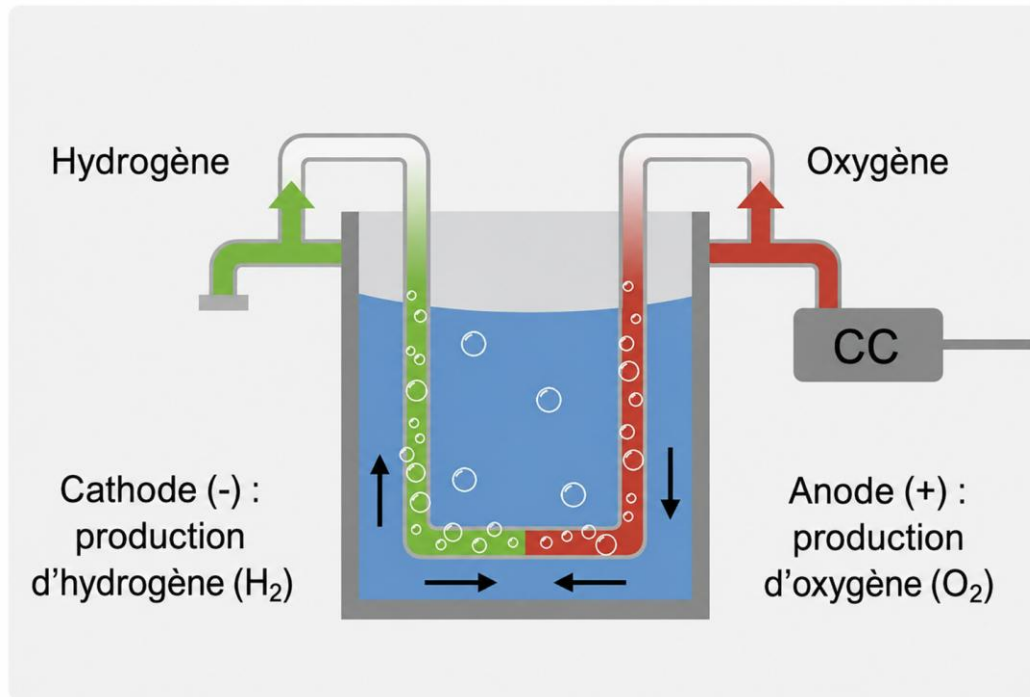


Figure 1.2 Procédé de base de l'électrolyse de l'eau

Les technologies d'électrolyse les plus courantes sont :

1. Électrolyse alcaline (AEL)
2. Électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEMEL)
3. Électrolyse à oxyde solide (SOEL)

1.3.1. Électrolyse alcaline (AEL)

Principe de base : l'électrolyse alcaline utilise un électrolyte alcalin liquide tel que :

- l'hydroxyde de potassium (KOH) ;

- l'hydroxyde de sodium (NaOH).

Deux électrodes sont séparées par un diaphragme qui permet le transfert des ions tout en empêchant le mélange des gaz.

Tableau 1.1 Caractéristiques de fonctionnement de l'AEL

Paramètre	Valeur typique
Électrolyte	Solution de KOH ou de NaOH
Température de fonctionnement	60 à 90 °C
Rendement	60 à 70 %
Pureté de l'hydrogène	Moyenne à élevée
Coût	Faible
Maturité technologique	Très mature

Avantages

- Faible coût d'investissement.
- Technologie industrielle éprouvée.
- Longue durée de fonctionnement.
- Adaptée aux grandes installations de production d'hydrogène.

Limites

- Réponse lente aux variations de la puissance électrique d'entrée.
- Encombrement physique plus important.
- Nécessité de manipuler un électrolyte liquide corrosif.

Applications pratiques

- Industrie des engrais.
- Usines chimiques.
- Systèmes de production continue d'hydrogène.

Notes pratiques à l'intention des techniciens

- Contrôler régulièrement la concentration de l'électrolyte.
- Inspecter les conduites et les électrodes afin de détecter la corrosion.
- Surveiller les fuites de gaz et l'état du diaphragme.

- Technologie adaptée aux sites où l'alimentation électrique est stable.

1.3.2. Électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEMEL)

Principe de base : les électrolyseurs PEM utilisent une membrane polymère solide à la place d'un électrolyte liquide. La membrane conduit les protons (ions H^+) de l'anode vers la cathode.

Avantages

- Conception compacte.
- Grande pureté de l'hydrogène.
- Démarrage et arrêt rapides.
- Excellente aptitude à l'intégration du solaire et de l'éolien.

Limites

- Coût initial plus élevé.
- Utilisation de matériaux catalytiques coûteux (platine, iridium).
- Sensibilité à la qualité de l'eau.

Applications pratiques

- Systèmes d'énergie renouvelable.
- Stations de ravitaillement en hydrogène.
- Laboratoires de recherche.
- Micro-réseaux intelligents.

Tableau 1.2 Caractéristiques de fonctionnement

Paramètre	Valeur typique
Électrolyte	Membrane polymère solide
Température de fonctionnement	50 à 80 °C
Rendement	65 à 80 %
Pureté de l'hydrogène	Très élevée
Coût	Élevé
Réponse dynamique	Très rapide

Notes pratiques :

- Utiliser de l’eau désionisée ou purifiée.
- Éviter la contamination de la membrane.
- Surveiller les systèmes de refroidissement et de pression.
- Option la mieux adaptée aux sources d’énergie renouvelable intermittentes.

1.3.3. Électrolyse à oxyde solide (SOEL)

Principe de base : l’électrolyse à oxyde solide utilise un électrolyte céramique fonctionnant à très haute température. Une partie de l’énergie nécessaire est apportée sous forme de chaleur, ce qui réduit la demande d’énergie électrique.

Avantages

- Très haut rendement.
- Consommation d’énergie électrique plus faible.
- Possibilité d’utiliser la chaleur fatale industrielle.

Limites

- Température de fonctionnement très élevée.
- Gestion thermique complexe.
- Matériaux coûteux.
- Durée de vie plus courte des composants.

Applications pratiques

- Installations industrielles de production d’hydrogène.
- Intégration avec les centrales nucléaires et thermiques.
- Systèmes de stockage d’énergie à grande échelle.

Tableau 1.3 Caractéristiques de fonctionnement

Paramètre	Valeur typique
Électrolyte	Oxyde solide céramique
Température de fonctionnement	600 à 850 °C
Rendement	80 à 90 %
Pureté de l’hydrogène	Très élevée
Coût	Très élevé

Paramètre	Valeur typique
Statut technologique	Émergent

Notes pratiques :

- L’isolation thermique est essentielle.
- Des procédures rigoureuses de démarrage et d’arrêt sont nécessaires.
- Une surveillance continue de la température est nécessaire.
- Technologie principalement adaptée à une exploitation à l’échelle industrielle.

1.3.4. Comparaison des technologies d’électrolyse

Tableau 1.4 Comparaison des différentes technologies d’électrolyse

Caractéristique	Alcaline (AEL)	PEM	Oxyde solide (SOEL)
Maturité technologique	Très mature	En développement commercial	Émergente
Type d’électrolyte	Alcalin liquide	Membrane polymère	Oxyde céramique
Température de fonctionnement	Faible	Faible	Très élevée
Rendement	Moyen	Élevé	Très élevé
Coût d’investissement	Faible	Élevé	Très élevé
Compatibilité avec les énergies renouvelables	Modérée	Excellente	Modérée
Complexité de maintenance	Moyenne	Moyenne	Élevée
Meilleure application	Exploitation industrielle continue	Systèmes intégrant des énergies renouvelables	Grandes installations industrielles

1.3.5. Lignes directrices pour le choix de la technologie

Lors des études de faisabilité ou de la conception d’un système, les facteurs indiqués dans le tableau 1.5 doivent être évalués.

Tableau 1.5 Facteurs à évaluer lors des études de faisabilité et de la conception

Critère de conception	Technologie recommandée
Coût d'installation le plus faible	Alcaline
Intégration solaire/éolien	PEM
Rendement le plus élevé	SOEL
Petit système compact	PEM
Grande production continue d'hydrogène	Alcaline
Disponibilité de chaleur fatale industrielle	SOEL

Activités pratiques

Activité 1 - Atelier de sélection technologique (3 heures)

À partir de trois scénarios de projet (usine chimique à fonctionnement stable, station isolée alimentée par énergie solaire, éolien en mer), sélectionner une technologie et justifier le choix au moyen d'une matrice de décision d'une page.

Activité 2 - Interprétation de fiches techniques (2 heures)

Fournir des fiches techniques réelles (anonymisées) de Nel, ITM Power ou Sunfire. Les apprenants doivent relever la puissance nominale, le rendement, la plage de fonctionnement et les intervalles de maintenance.

Activité 3 - Exercice de dimensionnement de base (laboratoire)

Calculer le nombre de cellules et la puissance nécessaire pour produire 100 Nm³/h d'hydrogène à l'aide de technologies AEL et PEMEL.

1.4. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux de l'électrolyse de l'eau et son rôle dans la production d'hydrogène propre. Les principes de fonctionnement des cellules d'électrolyse, les réactions aux électrodes, les électrolytes et les calculs de production d'hydrogène fondés sur les lois de Faraday ont été abordés dans une perspective technique et pratique. Le chapitre a également présenté les trois principales technologies d'électrolyse :

- Électrolyse alcaline (AEL)
- Électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEMEL)

- Électrolyse à oxyde solide (SOEL)

Leurs conditions de fonctionnement, leur rendement, leur coût, leurs avantages, leurs limites et leurs applications pratiques ont été comparés. L'électrolyse alcaline convient à la production industrielle d'hydrogène à grande échelle et à faible coût. L'électrolyse PEM est particulièrement adaptée à l'intégration des énergies renouvelables grâce à sa réponse rapide et à sa conception compacte, tandis que la technologie SOEL offre un très haut rendement pour des applications industrielles avancées. Toutefois, aucune technologie d'électrolyse n'est la meilleure pour toutes les applications. Le choix de la technologie dépend notamment des facteurs suivants :

- disponibilité de la source d'énergie ;
- budget ;
- pureté d'hydrogène requise ;
- taille du système ;
- conditions de fonctionnement ;
- capacité de maintenance.

Dans les systèmes modernes de production d'hydrogène fondés sur les énergies renouvelables, l'électrolyse PEM est de plus en plus privilégiée en raison de sa compatibilité avec les systèmes solaires photovoltaïques et éoliens. Le choix approprié de la technologie est donc essentiel pour disposer de systèmes de production d'hydrogène sûrs, efficaces et économiquement performants.

1.5. Questions de révision de fin de chapitre

4. Un système doit produire 200 kg de H_2 par jour. Calculer le courant minimal requis pour un rendement faradique de 98 % (présenter les étapes de conversion).
5. Si un empilement consomme 55 kWh par kg de H_2 , quelle quantité d'électricité est nécessaire par mois pour une production de 500 kg/jour ?
6. Recommander une technologie pour une centrale solaire de 2 MW en Éthiopie. Donner trois raisons techniques.
7. La production d'hydrogène est inférieure de 25 % à la valeur attendue pour un même courant. Énumérer quatre causes probables par ordre de vraisemblance et indiquer les étapes d'inspection correspondantes.

Composants des systèmes d'électrolyse et principes de fonctionnement

Objectifs d'apprentissage

- Identifier et inspecter les principaux composants des cellules d'électrolyseurs AEL et PEM, des empilements (stacks) et des systèmes auxiliaires de l'installation (Balance of Plant, BoP).
- Lire et interpréter les fiches techniques d'électrolyseurs, les courbes de polarisation et les schémas de tuyauterie et d'instrumentation (P&ID) de base pour l'exploitation et la conception des systèmes.
- Expliquer comment les paramètres de fonctionnement tels que la température, la pression, la densité de courant et la qualité de l'eau influencent les performances et le rendement de l'électrolyseur.
- Sélectionner et dimensionner les principaux composants auxiliaires, notamment les redresseurs, les unités de purification de l'eau, les compresseurs et les systèmes de refroidissement.
- Appliquer les procédures d'exploitation et de sécurité pour démarrer, surveiller, dépanner et entretenir les systèmes d'électrolyse.

2.1. Composants d'une cellule d'électrolyseur

Une cellule d'électrolyseur est constituée de plusieurs composants importants qui fonctionnent ensemble afin de produire de l'hydrogène et de l'oxygène de manière sûre et efficace. En tant que technicien, vous devez être capable d'identifier ces composants, de comprendre leurs fonctions et d'effectuer les opérations d'inspection, d'entretien et de remplacement pendant l'exploitation et la maintenance. La figure 2.1 présente la structure d'une cellule d'électrolyseur PEM ; la membrane mince située au centre ainsi que les canaux d'écoulement des gaz doivent être inspectés lors des opérations de maintenance afin de détecter toute obstruction ou corrosion.

Lors des séances de laboratoire ou des travaux en atelier, les apprenants doivent démonter une cellule d'électrolyseur pédagogique ou étudier des modèles en coupe afin d'identifier physiquement les éléments suivants :

- anode ;
- cathode ;
- membrane ou diaphragme ;
- couche de diffusion gazeuse (GDL) ;
- plaques bipolaires ;
- joints et éléments d'étanchéité.

Comprendre l'emplacement et la fonction de chaque élément aide les techniciens à détecter rapidement des défauts tels que les fuites, une faible production de gaz, une surchauffe, une chute de pression ou une augmentation de la tension.

Tableau 2.1 Principaux composants d'une cellule d'électrolyseur

Composant	Fonction principale	Notes pratiques pour le technicien
Anode	La réaction de dégagement d'oxygène s'y produit.	Vérifier l'absence de corrosion et de dégradation du catalyseur.
Cathode	La réaction de dégagement d'hydrogène s'y produit.	Rechercher l'entartrage et les contaminations.
Membrane / diaphragme	Sépare les gaz et permet le transfert ionique.	Ne jamais toucher à mains nues.
Couche de diffusion gazeuse (GDL)	Répartit les gaz et soutient la couche catalytique.	Rechercher les obstructions ou les dommages physiques.
Plaques bipolaires	Conduisent le courant et distribuent l'eau/les gaz.	Inspecter les canaux d'écoulement afin de détecter toute obstruction.
Joints / éléments d'étanchéité	Empêchent les fuites de gaz et d'eau.	Remplacer s'ils sont fissurés ou comprimés.

Activités pratiques en atelier

Les techniciens doivent s'exercer aux opérations suivantes :

- identifier les composants à partir de vues éclatées et d'empilements réels ;
- remonter correctement les cellules après inspection ;
- nettoyer les canaux d'écoulement des plaques bipolaires ;
- vérifier l'état de l'étanchéité ;
- mesurer les écarts de tension entre cellules ;
- détecter les points de fuite.

Consignes pratiques importantes

- Ne jamais toucher les membranes PEM à mains nues, car la contamination par des huiles ou des salissures peut endommager définitivement la membrane.
- Dans les électrolyseurs PEM, l'assemblage membrane-électrodes (MEA), en particulier le catalyseur anodique revêtu d'iridium, est l'un des composants les plus coûteux et doit être manipulé avec précaution.
- Utiliser uniquement des produits de nettoyage approuvés et de l'eau déionisée lors des opérations de maintenance.
- Inspecter régulièrement les canaux des plaques bipolaires afin de détecter l'entartrage, la corrosion ou les obstructions susceptibles de réduire le débit de gaz et le rendement.

- Remplacer immédiatement les joints endommagés afin d'éviter les fuites d'hydrogène et une exploitation dangereuse.

Tableau 2.2 Indicateurs courants de défaut

Observation	Cause possible
Augmentation de la tension de cellule	Assèchement de la membrane ou obstruction
Faible production d'hydrogène	Dégradation du catalyseur ou fuite
Température non uniforme	Mauvaise circulation de l'eau
Chute de pression	Canaux d'écoulement obstrués
Contamination du gaz	Endommagement de la membrane ou défaillance de l'étanchéité

Une bonne compréhension des composants de la cellule d'électrolyseur améliore la rapidité du dépannage, la fiabilité du système, la sécurité d'exploitation et la durée de vie des équipements.

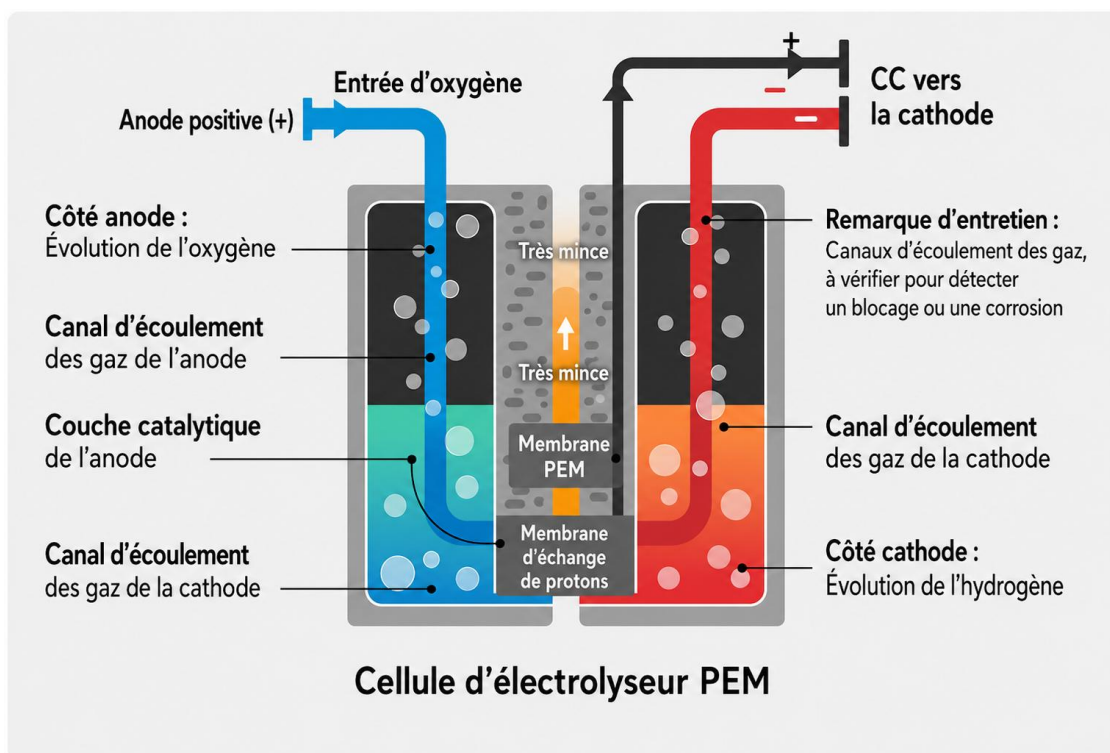


Figure 2.1 Structure d'une cellule d'électrolyseur PEM

2.2. Réactions électrochimiques et transport ionique

Les réactions électrochimiques à l'intérieur de l'électrolyseur convertissent l'énergie électrique en énergie chimique en dissociant l'eau en hydrogène et en oxygène gazeux. Pour les techniciens et les opérateurs de

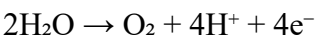
systèmes, la compréhension de ces réactions est importante pour surveiller les performances du système, diagnostiquer les défauts et exploiter l'électrolyseur dans des limites sûres.

Pendant le fonctionnement, les ions traversent l'électrolyte ou la membrane tandis que les électrons circulent dans le circuit électrique externe. Tout problème affectant le transport des ions ou le flux d'électrons réduit directement le rendement et la production d'hydrogène.

2.2.1. Réactions électrochimiques fondamentales

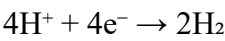
a) Réactions dans un électrolyseur PEM

Réaction à l'anode (dégagement d'oxygène)



À l'anode, l'eau se dissocie en oxygène gazeux, protons et électrons.

Réaction à la cathode (dégagement d'hydrogène)



L'hydrogène gazeux est produit à la cathode.

Réaction globale

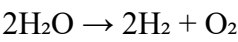


Tableau 2.3 Transport des ions et des électrons

Processus	Direction
Déplacement des protons (H ⁺)	À travers la membrane, de l'anode vers la cathode
Flux d'électrons	Dans le circuit électrique externe
Alimentation en eau	Vers le côté anode
Formation d'hydrogène gazeux	À la cathode
Formation d'oxygène gazeux	À l'anode

Un transport ionique correct est essentiel au fonctionnement efficace de l'électrolyseur. Un mauvais état de la membrane, une contamination, une alimentation en eau insuffisante ou une surchauffe peuvent augmenter la résistance et réduire la production d'hydrogène.

b) Courbe de polarisation et diagnostic pratique

L'un des outils de diagnostic les plus importants pour les techniciens en électrolyse est la courbe de polarisation (figure 2.2), qui représente la relation entre :

- la tension de cellule ;
- la densité de courant.

La lecture de la courbe permet aux techniciens de déterminer :

- le rendement du système ;
- la zone de fonctionnement sûre ;
- l'état de dégradation de l'empilement ;
- un comportement de fonctionnement anormal.

Principales zones de la courbe de polarisation

1. Zone des pertes d'activation (faible courant)

Cette zone se situe à faible densité de courant, lorsqu'une tension supplémentaire est nécessaire pour amorcer les réactions électrochimiques.

Indicateurs pratiques

- faible activité du catalyseur ;
- comportement de démarrage lent ;
- dégradation du catalyseur.

Actions du technicien

- inspecter l'état du catalyseur ;
- vérifier la température de fonctionnement ;
- vérifier que l'alimentation en eau est correcte.

2. Zone des pertes ohmiques (zone linéaire)

Il s'agit de la zone normale de fonctionnement, dans laquelle la tension augmente presque linéairement avec le courant.

Indicateurs pratiques

- résistance de la membrane ;
- résistance des contacts électriques ;
- problèmes de qualité de l'eau.

Actions du technicien

- vérifier l'hydratation de la membrane ;
- inspecter les connexions électriques ;
- vérifier la qualité de l'eau déionisée.

3. Zone des pertes de concentration (courant élevé)

À très forte densité de courant, les bulles de gaz et les limitations du transport de matière réduisent rapidement les performances.

Indicateurs pratiques

- augmentation soudaine de la tension ;

- diminution du rendement de production de gaz ;
- risque de surchauffe.

Actions du technicien

- réduire le courant de fonctionnement ;
- améliorer le refroidissement et la circulation de l'eau ;
- vérifier que les canaux d'écoulement des gaz ne sont pas obstrués.

Activités pratiques en atelier

Pendant les séances de laboratoire ou de simulation, les apprenants doivent s'exercer à :

- tracer les données tension-courant ;
- identifier les trois zones de polarisation ;
- comparer les courbes d'un empilement sain et d'un empilement dégradé ;
- déterminer la densité de courant maximale admissible en fonctionnement ;
- diagnostiquer les défauts possibles à partir d'un comportement anormal de la courbe.

Consignes importantes pour le technicien

- Exploiter principalement l'électrolyseur dans la zone linéaire (ohmique) afin d'obtenir des performances stables.
- Éviter un fonctionnement prolongé dans la zone des pertes de concentration, car cela accélère la dégradation et la surchauffe.
- Enregistrer régulièrement la tension et le courant afin de suivre l'état de l'empilement dans le temps.
- Une augmentation soudaine de la tension à courant constant indique souvent une contamination de la membrane, un entartrage ou une mauvaise circulation de l'eau.

La compréhension des réactions électrochimiques et du comportement de polarisation aide les techniciens à maintenir une production efficace d'hydrogène, à prévenir les dommages aux équipements et à prolonger la durée de vie de l'électrolyseur.

La figure 2.2 illustre la courbe de polarisation d'un électrolyseur, utilisée pendant l'exploitation. Si vos points mesurés se déplacent vers le haut (tension plus élevée), planifiez immédiatement une inspection. Ne dépassez jamais la densité de courant à partir de laquelle apparaissent les pertes de concentration (risque d'insuffisance d'alimentation en gaz).

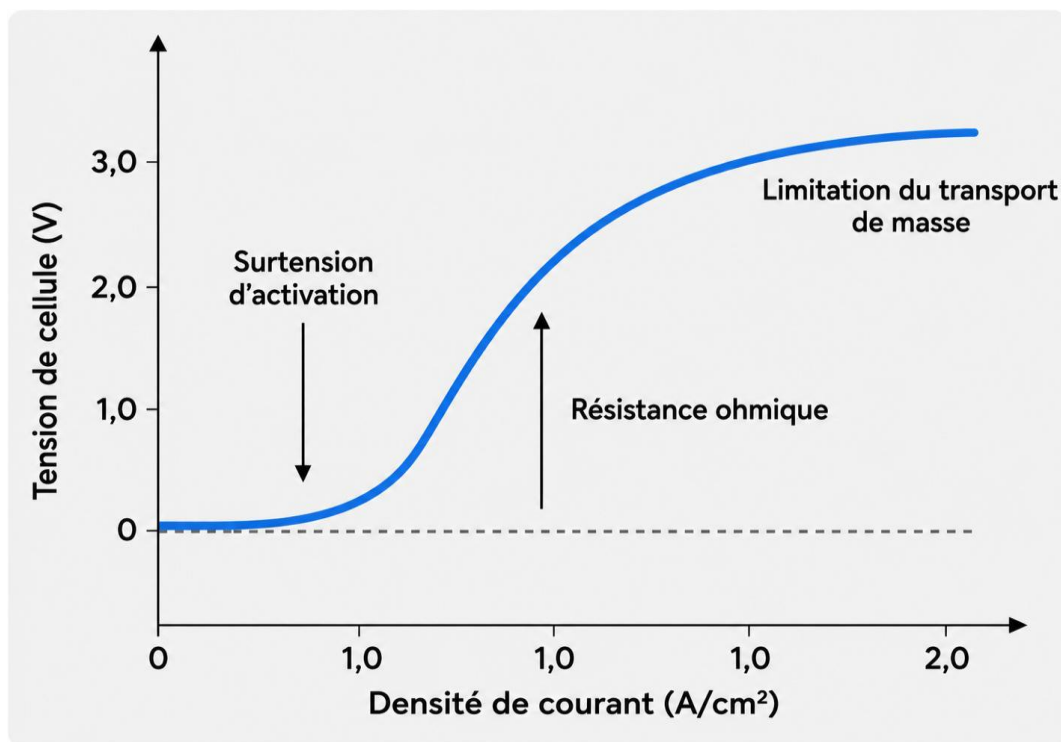


Figure 2.2 Courbe de polarisation d'un électrolyseur

Activité en classe

Un empilement PEM présente une tension de 1,85 V par cellule à 2 A/cm². Si la tension augmente à 2,1 V au même courant après 8 000 heures, calculez le taux approximatif de dégradation et déterminez l'action à entreprendre.

2.3. Composants des systèmes auxiliaires de l'installation (BoP)

L'empilement de l'électrolyseur ne peut, à lui seul, produire de l'hydrogène de manière sûre et continue sans les sous-systèmes de support appelés systèmes auxiliaires de l'installation (Balance of Plant, BoP). Dans les installations d'hydrogène réelles, l'empilement ne représente généralement que 40 à 60 % du système complet, tandis que la plupart des problèmes d'exploitation et des temps d'arrêt de l'installation sont dus à une mauvaise conception du BoP, à un entretien inadéquat ou à une défaillance de composant.

En tant que technicien ou concepteur de systèmes, vous devez comprendre la fonction, l'exploitation, l'inspection et la maintenance des composants du BoP, car ils influencent directement :

- le rendement du système ;
- la pureté de l'hydrogène ;
- la durée de vie des équipements ;
- la sécurité d'exploitation ;
- la fiabilité de l'installation.

Tableau 2.4 Principaux composants des systèmes auxiliaires de l'installation (BoP)

Composant	Fonction principale	Notes pratiques pour le technicien
-----------	---------------------	------------------------------------

Composant	Fonction principale	Notes pratiques pour le technicien
Système de purification de l'eau	Fournit une eau de haute pureté.	Surveiller la conductivité et l'état des filtres.
Redresseur / électronique de puissance	Convertit le courant alternatif (CA) en courant continu (CC) contrôlé.	Vérifier la stabilité de la tension et l'ondulation.
Pompes	Assurent la circulation de l'eau et du fluide de refroidissement.	Inspecter le débit et les fuites.
Compresseurs	Augmentent la pression de stockage de l'hydrogène.	Surveiller le niveau d'huile et les vibrations.
Sécheurs de gaz	Éliminent l'humidité de l'hydrogène.	Vérifier les indicateurs d'humidité.
Système de refroidissement / échangeur de chaleur	Évacue la chaleur excédentaire.	Vérifier le débit du fluide de refroidissement et la température.

2.3.1. Système de purification de l'eau

Les électrolyseurs, en particulier les systèmes PEM, nécessitent une eau hautement purifiée afin d'éviter la contamination de la membrane et la dégradation des performances.

Les étapes typiques de traitement de l'eau comprennent :

- osmose inverse (RO) ;
- déionisation (DI) ;
- filtration.

Tâches pratiques du technicien

- mesurer régulièrement la conductivité de l'eau ;
- remplacer les filtres lorsque la perte de charge augmente ;
- inspecter les membranes d'osmose inverse afin de détecter l'encrassement ;
- assurer une alimentation continue en eau déionisée.

Remarque : Une eau de mauvaise qualité peut endommager définitivement les membranes et les catalyseurs.

2.3.2. Redresseur et électronique de puissance

Le redresseur convertit l'alimentation électrique en courant alternatif en une alimentation stable en courant continu nécessaire à l'empilement de l'électrolyseur.

Fonctions principales

- contrôler le courant de fonctionnement ;

- maintenir une tension stable ;
- protéger l'empilement contre les fluctuations électriques.

Tâches pratiques du technicien

- mesurer la tension et le courant de sortie ;
- inspecter les ventilateurs de refroidissement et les bornes électriques ;
- surveiller la distorsion harmonique et l'ondulation.

Consigne d'exploitation importante

- Le rendement du redresseur doit normalement être supérieur à 96 %.

Une ondulation excessive du courant peut :

- surchauffer l'empilement ;
- endommager les membranes ;
- accélérer la dégradation du catalyseur.

2.3.3. Pompes, compresseurs et sécheurs de gaz

Ces composants assurent la circulation des fluides, le transport des gaz et le conditionnement de l'hydrogène.

Pompes : utilisées pour :

- la circulation de l'eau ;
- les boucles de refroidissement ;
- le déplacement de l'électrolyte dans les systèmes AEL.

Compresseurs : utilisés pour :

- augmenter la pression de stockage de l'hydrogène ;
- alimenter en hydrogène les réservoirs de stockage ou les systèmes utilisant ce combustible.

Sécheurs de gaz : utilisés pour :

- éliminer l'humidité du gaz hydrogène ;
- améliorer la pureté du gaz.

Tâches pratiques du technicien

- vérifier quotidiennement le niveau d'huile du compresseur ;
- surveiller les bruits et vibrations anormaux ;
- inspecter les fuites de tuyauterie et les manomètres ;
- vérifier les niveaux de pureté de l'hydrogène.

2.3.4. Système de refroidissement et échangeurs de chaleur

L'électrolyse génère de la chaleur pendant le fonctionnement. Les systèmes de refroidissement maintiennent une température de fonctionnement sûre et améliorent le rendement.

Principaux composants

- pompes de refroidissement ;

- échangeurs de chaleur ;
- ventilateurs de refroidissement ;
- capteurs de température.

Tâches pratiques du technicien

- vérifier le débit du fluide de refroidissement avant le démarrage ;
- rechercher les fuites de fluide de refroidissement ;
- surveiller les températures d'entrée et de sortie ;
- nettoyer régulièrement les surfaces des échangeurs de chaleur.

Consigne d'exploitation importante : Un refroidissement insuffisant peut provoquer :

- une surchauffe de l'empilement ;
- une réduction du rendement ;
- un endommagement de la membrane ;
- un arrêt d'urgence.

Activités pratiques en atelier

Lors des travaux de laboratoire ou sur le terrain, les apprenants doivent :

- identifier tous les principaux composants du BoP sur un système réel ou simulé ;
- suivre les circuits d'eau, de gaz, de refroidissement et d'électricité ;
- mesurer la pression, la température et le débit ;
- effectuer des inspections avant démarrage ;
- diagnostiquer les défauts courants du BoP ;
- lire les schémas P&ID du système.

Liste de contrôle de sécurité et d'exploitation

Avant le démarrage quotidien :

- vérifier le débit du système de refroidissement ;
- contrôler le niveau de pureté de l'eau ;
- inspecter les points susceptibles de présenter des fuites de gaz ;
- confirmer le bon fonctionnement du redresseur ;
- vérifier le niveau d'huile du compresseur ;
- vérifier le fonctionnement des capteurs et des alarmes.

Pendant le fonctionnement :

- surveiller en continu la pression et la température ;
- observer tout bruit ou vibration inhabituel ;
- enregistrer les mesures de tension et de courant ;
- contrôler régulièrement la pureté de l'hydrogène.

Tableau 2.5 Indicateurs courants de défaut du BoP

Observation	Cause possible
Surchauffe de l'empilement	Défaillance du système de refroidissement
Faible pureté de l'hydrogène	Problème de sécheur ou de membrane
Fluctuation de pression	Problème de compresseur ou fuite
Forte variation de tension	Instabilité du redresseur
Débit d'eau réduit	Obstruction de la pompe ou colmatage du filtre

Une bonne compréhension et un entretien approprié des systèmes BoP améliorent considérablement les performances de l'électrolyseur, la sécurité, la stabilité d'exploitation et la durée de vie des équipements. Le tableau 2.6 présente les paramètres de fonctionnement et leurs effets. Vous réglerez et surveillerez ces paramètres quotidiennement afin de maintenir le rendement et de prévenir les dommages.

Tableau 2.6 Paramètres de fonctionnement et leurs effets

Paramètre	Effet sur les performances	Valeur typique	Action à réaliser
Température	Plus élevée = meilleur rendement	60–80 °C (PEM)	Surveiller et réguler le refroidissement
Pression	Plus élevée = meilleure densité du gaz	1–30 bar	Régler en fonction des besoins de stockage
Densité de courant	Plus élevée = production accrue, mais davantage de chaleur	Voir la technologie	Rester dans la zone optimale de la courbe de polarisation
Qualité de l'eau	Mauvaise qualité = dégradation rapide	< 0,1 µS/cm (PEM)	Vérifier le conductimètre à chaque poste

Activité pratique

- Utiliser un petit électrolyseur de laboratoire : faire varier la température et le courant, puis enregistrer la tension et la production de H₂.

2.4. Exigences de sécurité et d'exploitation

Les systèmes de production d'hydrogène présentent des dangers d'origine électrique, chimique, thermique et liés à la pression. Une exploitation sûre constitue l'une des responsabilités les plus importantes des techniciens,

opérateurs et personnels de maintenance des électrolyseurs. Le non-respect des procédures de sécurité peut entraîner un incendie, une explosion, des dommages matériels ou des blessures graves.

Les techniciens doivent donc comprendre les dangers du système, appliquer correctement les procédures d'exploitation et réagir rapidement en cas de situation anormale ou d'urgence.

Tableau 2.7 Principaux dangers dans les systèmes d'électrolyse

Danger	Risque	Méthode pratique de maîtrise
Fuite d'hydrogène	Incendie ou explosion	Détection de gaz et ventilation
Haute tension CC	Électrocution	Isolement électrique et équipements de protection individuelle (EPI)
Électrolyte caustique (AEL)	Brûlures chimiques	Manipulation appropriée et équipement de protection
Gaz à haute pression	Rupture de tuyauterie ou explosion	Soupape de décharge et surveillance
Température élevée	Brûlures et surchauffe	Surveillance du système de refroidissement

2.4.1. Danger lié aux fuites d'hydrogène

L'hydrogène est très inflammable et peut former des mélanges explosifs dans l'air.

Plage d'explosivité de l'hydrogène dans l'air : $4 \% \leq H_2 \leq 75 \%$

Comme l'hydrogène gazeux est incolore et inodore, les fuites peuvent être difficiles à détecter sans capteurs.

Responsabilités pratiques du technicien

- effectuer quotidiennement des inspections de détection des fuites ;
- vérifier régulièrement les détecteurs d'hydrogène ;
- s'assurer que les systèmes de ventilation fonctionnent ;
- resserrer les raccords et inspecter les joints de tuyauterie.

Indicateurs courants de fuite

- chute soudaine de pression ;
- déclenchement de l'alarme d'un capteur ;
- sifflement à proximité d'une tuyauterie ;
- mesures anormales de concentration de gaz.

2.4.2. Sécurité électrique

Les électrolyseurs fonctionnent avec des courants et tensions continus élevés fournis par des redresseurs et des équipements d'électronique de puissance.

Dangers électriques

- électrocution ;
- court-circuit ;
- arc électrique ;
- dommages aux équipements.

Procédures pratiques de sécurité

- isoler l'alimentation électrique avant toute intervention de maintenance ;
- utiliser des outils isolés et des EPI ;
- vérifier les connexions de mise à la terre ;
- ne jamais toucher des bornes sous tension.

Consigne importante pour le technicien

Toujours appliquer les procédures de consignation des énergies (Lockout/Tagout, LOTO) avant toute intervention sur un équipement électrique.

2.4.3. Sécurité chimique (systèmes AEL)

Les électrolyseurs alcalins utilisent des électrolytes caustiques tels que :

- hydroxyde de potassium (KOH) ;
- hydroxyde de sodium (NaOH).

Ces produits chimiques peuvent provoquer :

- des brûlures cutanées ;
- des lésions oculaires ;
- de la corrosion.

Procédures pratiques de sécurité

- porter des gants, des lunettes de protection et des vêtements de protection ;
- neutraliser immédiatement les déversements ;
- rincer abondamment à l'eau toute peau exposée ;
- stocker les produits chimiques dans des récipients homologués.

2.4.4. Sécurité liée aux hautes pressions

Les systèmes de stockage et de compression de l'hydrogène fonctionnent à haute pression.

Risques

- rupture de tuyauterie ou de réservoir ;
- dégagement soudain de gaz ;

- risque d'explosion.

Tâches pratiques du technicien

- inspecter quotidiennement les manomètres ;
- vérifier l'état des soupapes de décharge ;
- contrôler le fonctionnement du compresseur ;
- surveiller les vibrations anormales ou les surchauffes.

Consigne d'exploitation importante

- Ne jamais neutraliser, contourner ni obturer les soupapes de décharge.

Ronde de sécurité quotidienne et inspection d'exploitation

Les techniciens doivent effectuer des inspections de sécurité de routine avant le démarrage du système et pendant son fonctionnement.

Liste de contrôle quotidienne de sécurité et d'exploitation

Avant le démarrage :

- tester les capteurs d'hydrogène et les systèmes d'alarme ;
- vérifier que les ventilateurs de ventilation sont opérationnels ;
- contrôler le système d'arrêt d'urgence (ESD) ;
- inspecter les soupapes de décharge ;
- confirmer le fonctionnement du système de refroidissement ;
- rechercher toute fuite de gaz ou d'eau ;
- vérifier la mise à la terre et les connexions électriques.

Pendant le fonctionnement :

- surveiller la pression, la température et la pureté du gaz ;
- observer tout bruit ou vibration anormal ;
- vérifier les indicateurs d'alarme ;
- enregistrer les données d'exploitation.

Après l'arrêt :

- isoler l'alimentation électrique en toute sécurité ;
- dépressuriser les systèmes si nécessaire ;
- inspecter les composants afin de détecter toute surchauffe ou fuite.

Tableau 2.8 Actions d'intervention d'urgence

Situation d'urgence	Action immédiate
Fuite d'hydrogène détectée	Activer l'ESD et ventiler la zone
Incendie ou étincelle	Isoler l'alimentation électrique et évacuer

Situation d'urgence	Action immédiate
Déversement d'électrolyte	Neutraliser et nettoyer en toute sécurité
Alarme de surpression	Arrêter le compresseur et inspecter le système de décharge
Défaillance du refroidissement	Réduire la charge ou arrêter le système

Activités pratiques en atelier

Lors des séances de laboratoire et d'atelier, les apprenants doivent s'exercer à :

- utiliser des détecteurs d'hydrogène ;
- effectuer des inspections de sécurité ;
- appliquer les procédures de consignation LOTO ;
- réagir à des alarmes simulées ;
- identifier des conditions de fonctionnement dangereuses ;
- utiliser correctement les extincteurs et les EPI.

Une bonne pratique de la sécurité est essentielle à la fiabilité de la production d'hydrogène, à la protection des équipements et à la sécurité des conditions de travail dans les installations d'électrolyse.

Activités pratiques / de mise en œuvre

a. Activité 1 – Identification et inspection des composants (4 heures)

Démonter une cellule d'électrolyseur pédagogique. Identifier et mesurer l'usure de la GDL, des plaques bipolaires et des joints.

b. Activité 2 – Mesure de la courbe de polarisation (4 heures)

Raccorder un petit électrolyseur, mesurer la courbe I-V à différentes températures et tracer les résultats.

c. Activité 3 – Scénario de dépannage (3 heures)

« La tension de l'empilement a augmenté de 18 % au même courant. Dressez la liste des causes probables et proposez une procédure de diagnostic étape par étape. »

2.5. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les principaux composants, le fonctionnement et les exigences de sécurité des systèmes d'électrolyse du point de vue pratique du technicien. La structure et les fonctions des composants d'une cellule d'électrolyseur, tels que l'anode, la cathode, la membrane, la couche de diffusion gazeuse, les plaques bipolaires et les matériaux d'étanchéité, ont été expliquées en même temps que leurs procédures d'inspection et de maintenance.

Le chapitre a également présenté les réactions électrochimiques, les mécanismes de transport ionique et l'utilisation des courbes de polarisation pour surveiller les performances de l'empilement, identifier les zones de fonctionnement et diagnostiquer la dégradation du système. L'interprétation pratique des pertes d'activation, ohmiques et de concentration a été mise en avant afin d'assurer une exploitation sûre et efficace.

Les principaux composants des systèmes auxiliaires de l'installation (BoP), notamment les systèmes de purification de l'eau, les redresseurs, les pompes, les compresseurs, les sécheurs et les systèmes de refroidissement, ont été présentés avec leurs fonctions opérationnelles, leurs exigences de maintenance et leurs indicateurs courants de défaut. L'importance d'une conception et d'une maintenance appropriées du BoP pour réduire les temps d'arrêt de l'installation a été soulignée. Enfin, le chapitre a abordé les principales exigences de sécurité et d'exploitation des systèmes de production d'hydrogène. Les principaux dangers, tels que les fuites d'hydrogène, la haute tension en courant continu, les électrolytes caustiques et le fonctionnement à haute pression, ont été examinés avec les procédures pratiques de sécurité, les inspections quotidiennes, les systèmes d'arrêt d'urgence et les listes de contrôle opérationnelles.

Dans l'ensemble, le chapitre a souligné que l'exploitation efficace d'un électrolyseur dépend non seulement de l'empilement lui-même, mais aussi d'un entretien approprié des composants, de la fiabilité du BoP, de la surveillance des performances et de l'application rigoureuse des pratiques de sécurité.

2.6. Questions de révision de fin de chapitre

8. Un système d'électrolyseur PEM de 1 MW fonctionne à une densité de courant de $2,0 \text{ A/cm}^2$. Estimez la surface active totale des électrodes requise si chaque cellule possède une surface active de 500 cm^2 .
9. Un système d'électrolyseur produit moins d'hydrogène que prévu tandis que la tension de l'empilement devient anormalement élevée. Énumérez quatre causes probables par ordre de probabilité et décrivez les contrôles pratiques requis pour chaque cas.
10. Expliquez la fonction de la couche de diffusion gazeuse (GDL) dans une cellule d'électrolyseur. Quels problèmes de fonctionnement peuvent survenir si la GDL est obstruée ou endommagée ?
11. Expliquez comment la température, la pression et la densité de courant influencent le rendement de l'électrolyseur et le débit de production d'hydrogène.
12. Pourquoi une eau déionisée de haute pureté est-elle particulièrement importante dans les électrolyseurs PEM ? Quels problèmes peuvent survenir si une eau de mauvaise qualité est utilisée ?
13. Décrivez les fonctions des composants suivants des systèmes auxiliaires de l'installation (BoP) :
 - redresseur ;
 - compresseur ;
 - système de refroidissement ;
 - sécheur de gaz.
14. Lors d'une inspection quotidienne de sécurité d'une installation de production d'hydrogène, quels contrôles importants doivent être effectués avant le démarrage ? Citez au moins cinq éléments.

15. L'hydrogène gazeux présente une plage de concentration explosive dans l'air comprise entre 4 % et 75 %. Expliquez les mesures pratiques de sécurité utilisées dans les installations d'électrolyse afin de réduire les risques de fuite d'hydrogène et d'explosion.

H2-A1-3

Conception, modélisation et analyse des performances des systèmes d'électrolyse

Durée estimée : 32 heures

- Théorie / discussion guidée : 10 heures
- Travaux pratiques en laboratoire / atelier / simulation : 18 heures
- Travail autonome et évaluation : 4 heures

Objectifs d'apprentissage

- Effectuer le dimensionnement et les calculs d'un système d'électrolyseur, notamment le débit de production d'hydrogène, les besoins en puissance et le dimensionnement de l'empilement en fonction de la demande et des profils de charge.
- Concevoir et configurer des systèmes d'électrolyseurs, notamment des configurations autonomes, raccordées au réseau et alimentées par des énergies renouvelables, avec une sélection appropriée de l'électronique de puissance et des composants des systèmes auxiliaires de l'installation (refroidissement, récupération de chaleur et circulation d'eau).
- Modéliser et prévoir les performances du système à l'aide de modèles simples courant-tension et de rendement (par exemple dans Excel ou Python), et interpréter les courbes de performance des fabricants afin d'appuyer les décisions d'exploitation.
- Évaluer les performances et le rendement du système à l'aide d'indicateurs clés tels que le rendement faradique, la consommation énergétique spécifique et la pureté de l'hydrogène.
- Analyser le fonctionnement, la dégradation et les stratégies d'optimisation, notamment en interprétant les tendances de dégradation, en planifiant la maintenance préventive et en optimisant les paramètres de fonctionnement afin d'équilibrer le débit de production, le rendement et la durée de vie de l'empilement.

3.1. Demande en hydrogène et dimensionnement du système

Les systèmes de production d'hydrogène doivent être correctement dimensionnés afin de répondre à la demande du client de manière efficace et économique. Un dimensionnement incorrect peut entraîner des pénuries d'hydrogène, des coûts d'investissement excessifs, un faible rendement et une réduction de la durée de vie des équipements.

Les systèmes hydrogène sont conçus en fonction de la demande d'hydrogène requise et de la source d'électricité disponible. Un système correctement dimensionné garantit :

- une production d'hydrogène fiable ;
- une utilisation efficace de l'énergie électrique ;
- une longue durée de vie de l'empilement de l'électrolyseur ;
- une réduction des coûts d'exploitation ;

- une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelable.

Tableau 3.1 Effets d'un dimensionnement incorrect

Situation	Effet
Système sous-dimensionné	Production d'hydrogène insuffisante
Système surdimensionné	Capital immobilisé inutilement et faible taux d'utilisation
Mauvaise adéquation avec la production renouvelable	Fonctionnement instable et dégradation plus rapide

Demande en hydrogène : la demande en hydrogène correspond à la quantité d'hydrogène requise par l'utilisateur pendant une période donnée. Elle est généralement exprimée en kg/jour, kg/h ou Nm³/h.

Tableau 3.2 Exemples de demande en hydrogène

Application	Demande typique
Utilisation en laboratoire	1–5 kg/jour
Alimentation de secours par pile à combustible	5–20 kg/jour
Station de ravitaillement en hydrogène	50–500 kg/jour
Production industrielle	1 000+ kg/jour

Avant de dimensionner un système, la demande journalière doit d'abord être convertie en débit de production horaire.

La figure 3.1 illustre le débit de production d'hydrogène en fonction de la densité de courant, utilisé pour définir les limites supérieures de fonctionnement.

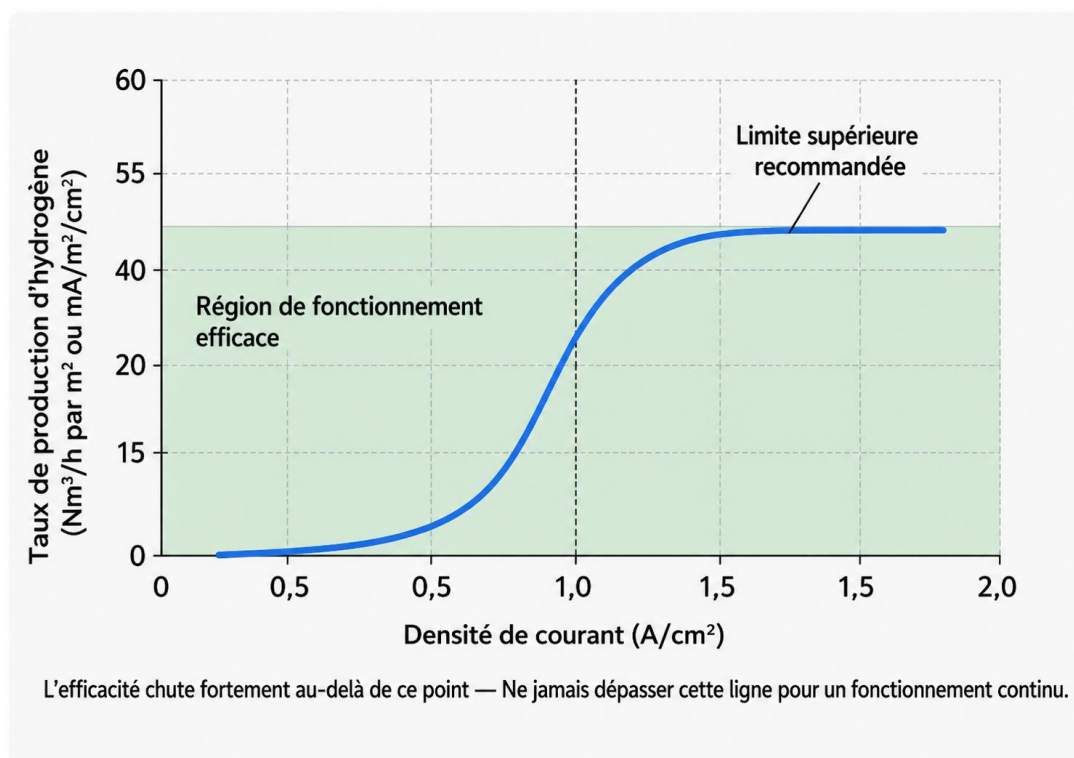


Figure 3.1 Débit de production d'hydrogène en fonction de la densité de courant

Indication de la figure : le rendement chute fortement au-delà de la limite indiquée ; ne jamais franchir cette ligne en fonctionnement continu.

Exemple

Un client a besoin de 24 kg d'hydrogène par jour. Demande horaire en hydrogène : 1 kg/h. Le système doit donc produire 1 kg d'hydrogène par heure.

Calcul de la production d'hydrogène

Le débit de production d'hydrogène d'un empilement d'électrolyseur est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Production de H}_2 \text{ (kg/h)} = I \times N_{\text{cells}} \times \eta F \times 0,00001036$$

où I est le courant de l'empilement (A), N_{cells} le nombre de cellules dans l'empilement, ηF le rendement faradique (valeur décimale) et 0,00001036 la constante de conversion indiquée dans la source.

Puissance requise par l'empilement

La puissance électrique consommée par l'empilement de l'électrolyseur est calculée comme suit :

$$\text{Puissance (kW)} = (\text{Tension de l'empilement} \times \text{Courant}) / 1\,000$$

où la tension de l'empilement est exprimée en volts et le courant en ampères.

Règle pratique de dimensionnement du système

Dans les systèmes hydrogène réels, les empilements d'électrolyseurs doivent normalement être dimensionnés de façon à fonctionner à 70–85 % de la capacité de puissance de crête. Cette règle est importante parce que les

sources d'énergie renouvelable telles que le solaire photovoltaïque et l'éolien ne fournissent pas une puissance constante. Un fonctionnement en dessous de la capacité maximale contribue à :

- prolonger la durée de vie de l'empilement ;
- réduire la surchauffe ;
- améliorer le rendement ;
- absorber les fluctuations de puissance renouvelable ;
- réduire la fréquence des opérations de maintenance.

Exemple 1

Un système de production d'hydrogène fonctionne avec les paramètres suivants :

Paramètres de l'exemple

Paramètre	Valeur
Courant	500 A
Nombre de cellules	200
Rendement faradique	0,95
Tension de l'empilement	420 V

Étape 1 : calcul de la production d'hydrogène

$$H_2 = 500 \times 200 \times 0,95 \times 0,00001036 = 0,9842 \text{ kg/h}$$

L'empilement produit donc environ 0,98 kg/h d'hydrogène.

Étape 2 : calcul de la puissance de l'empilement

$$\text{Puissance} = (420 \times 500) / 1\,000 = 210 \text{ kW}$$

L'électrolyseur nécessite donc une puissance électrique de 210 kW.

Exemple 2

Supposons qu'un système solaire photovoltaïque fournisse une puissance de crête de 250 kW.

$$\text{Dimensionnement minimal recommandé} = 0,70 \times 250 = 175 \text{ kW}$$

$$\text{Dimensionnement maximal recommandé} = 0,85 \times 250 = 212,5 \text{ kW}$$

La puissance recommandée de l'électrolyseur est donc comprise entre 175 et 212,5 kW. L'empilement de 210 kW calculé précédemment convient donc selon la règle donnée dans la source.

Considérations pratiques de conception

- l'augmentation future de la demande en hydrogène ;

- la variabilité de la production renouvelable ;
- la température de fonctionnement ;
- la qualité de l'eau ;
- le nombre d'heures de fonctionnement par jour ;
- les marges de sécurité.

Points clés à retenir

- La demande en hydrogène détermine la taille du système.
- Un dimensionnement approprié évite la sous-production et les investissements inutiles.
- La production d'hydrogène dépend du courant, du nombre de cellules et du rendement faradique.
- La puissance requise dépend de la tension de l'empilement et du courant.
- Les empilements d'électrolyseurs doivent généralement fonctionner à 70–85 % de la puissance de crête.

Activité

1. Une usine d'engrais a besoin de 1 000 kg H₂/jour (charge moyenne). À l'aide d'un électrolyseur PEM fonctionnant à 2,0 A/cm², avec un rendement faradique de 98 % et 1,85 V/cellule, calculez le nombre de cellules requis, la puissance totale et la surface active (supposez 500 cm² par cellule).
2. Un empilement fonctionne à 450 A avec 180 cellules et $\eta F = 0,94$. Calculez le débit de production d'hydrogène. Calculez ensuite la puissance consommée par un empilement fonctionnant à 400 V et 500 A.
3. Un système d'énergie renouvelable produit une puissance de crête de 300 kW. Déterminez la puissance recommandée de l'empilement d'électrolyseur en appliquant la règle des 70–85 %.

3.2. Configurations des systèmes d'électrolyse

Les systèmes d'électrolyse peuvent être raccordés à différentes sources d'électricité en fonction de l'application, de la disponibilité de l'énergie, des exigences de fiabilité et de l'environnement d'exploitation. Le choix de la configuration appropriée constitue une tâche importante pendant les phases d'étude de faisabilité et de conception d'un projet hydrogène.

Les techniciens et les ingénieurs sont chargés de :

- sélectionner des configurations de système adaptées ;
- raccorder les sources d'électricité aux électrolyseurs ;
- configurer les systèmes de commande ;
- assurer un fonctionnement stable et sûr ;
- entretenir les interfaces électriques.

Une configuration inappropriée peut entraîner :

- une production d'hydrogène instable ;
- des dommages aux équipements ;
- un faible rendement ;
- une augmentation des coûts d'exploitation.

3.2.1. Principales configurations des systèmes d'électrolyse

Les trois configurations les plus couramment utilisées dans les systèmes de production d'hydrogène sont :

1. configuration autonome ;
2. configuration raccordée au réseau ;
3. configuration alimentée par des énergies renouvelables.

Chaque configuration présente des composants, des avantages et des applications différents.

a. Système d'électrolyse autonome

Un système autonome fonctionne indépendamment du réseau électrique. Il est couramment utilisé dans les zones isolées où l'électricité du réseau n'est pas disponible.

Principaux composants

- source d'énergie renouvelable ou groupe électrogène ;
- banc de batteries ;
- convertisseur CC-CC ;
- empilement d'électrolyseur ;
- régulateur de charge ;
- système de commande.

Configuration de base : Source d'alimentation → Batterie tampon → Convertisseur CC-CC → Electrolyseur

Rôle de la batterie tampon : la batterie tampon stocke l'énergie électrique et stabilise la puissance fournie à l'électrolyseur.

Fonctions de la batterie tampon

- maintenir une tension CC stable ;
- compenser les fluctuations de la production renouvelable ;
- fournir une énergie de secours ;
- protéger l'électrolyseur contre les arrêts brusques.

Rôle du convertisseur CC-CC : le convertisseur CC-CC adapte les niveaux de tension et de courant entre la batterie et l'électrolyseur.

Fonctions

- régulation de la tension ;
- commande du courant ;
- stabilisation de la puissance ;
- protection contre les surtensions.

Tableau 3.3 Applications des systèmes autonomes

Application	Exemple
-------------	---------

Application	Exemple
Villages isolés	Production d'hydrogène hors réseau
Systèmes de secours pour télécommunications	Stockage d'énergie par pile à combustible
Stations de recherche isolées	Approvisionnement en hydrogène renouvelable

Avantages

- fonctionnement indépendant ;
- adapté aux sites isolés ;
- possibilité de fonctionner entièrement à partir d'énergies renouvelables.

Limites

- nécessite un stockage important sur batteries ;
- coût initial plus élevé ;
- limité par la disponibilité de l'énergie renouvelable.

b. Système d'électrolyse raccordé au réseau

Un système raccordé au réseau utilise directement l'électricité du réseau public. Cette configuration est largement utilisée pour la production industrielle d'hydrogène, car elle fournit une alimentation électrique stable et continue.

Principaux composants

- réseau électrique CA ;
- redresseur ;
- unité de correction du facteur de puissance ;
- empilement d'électrolyseur ;
- système de commande.

Configuration de base : Réseau CA → Redresseur → Alimentation CC → Electrolyseur

Rôle du redresseur : les électrolyseurs nécessitent une alimentation en courant continu, tandis que le réseau électrique fournit du courant alternatif. Le redresseur réalise la conversion : CA → CC.

Correction du facteur de puissance (PFC) : les électrolyseurs industriels absorbent des courants électriques élevés. Sans correction, le système peut fonctionner de façon moins efficace et accroître les pertes sur le réseau.

Fonctions de la correction du facteur de puissance

- améliorer le rendement électrique ;
- réduire les pertes liées à la puissance réactive ;

- stabiliser l'interaction avec le réseau ;
- réduire les pénalités tarifaires imposées par le fournisseur d'électricité.

Tableau 3.4 Applications des systèmes raccordés au réseau

Application	Exemple
Installations industrielles d'hydrogène	Production chimique
Stations de ravitaillement	Véhicules à hydrogène
Électrolyse à grande échelle	Industries sidérurgique et de l'ammoniac

Avantages

- alimentation électrique stable et continue ;
- forte capacité de production d'hydrogène ;
- moins d'interruptions d'exploitation.

Limites

- dépendance au réseau électrique ;
- coût de l'électricité potentiellement élevé ;
- augmentation possible des émissions de carbone si l'électricité du réseau est produite à partir de combustibles fossiles.

c. Système d'électrolyse alimenté par des énergies renouvelables

Les systèmes alimentés par des énergies renouvelables utilisent des sources telles que le solaire photovoltaïque, les éoliennes et les petites installations hydroélectriques. Ils sont importants pour la production d'hydrogène vert. Les types de configurations alimentées par des énergies renouvelables sont présentés ci-dessous.

A. Couplage direct en courant continu

Dans cette méthode, la puissance CC produite par le solaire photovoltaïque est directement raccordée à l'électrolyseur.

Configuration de base : Solaire PV → Contrôleur CC → Electrolyseur

Avantages du couplage direct en CC

- conception simple ;
- rendement élevé ;
- moins de pertes de conversion ;
- maintenance réduite.

Limites

- la production d'hydrogène varie avec l'ensoleillement ;
- difficulté à maintenir un fonctionnement stable ;
- absence de stockage d'énergie.

B. Système renouvelable hybride avec batterie

Ce système associe une source d'énergie renouvelable à un stockage sur batterie.

Configuration de base : Source renouvelable → Batterie → Convertisseur → Électrolyseur

Fonctions du système hybride

- stabiliser la puissance de sortie ;
- permettre le fonctionnement nocturne ;
- améliorer la régularité de la production d'hydrogène ;
- protéger l'électrolyseur contre les fluctuations de puissance.

Tableau 3.5 Applications des systèmes alimentés par des énergies renouvelables

Application	Exemple
Installations d'hydrogène vert	Production d'hydrogène renouvelable
Systèmes de stockage d'énergie	Valorisation des excédents solaires
Transport durable	Stations de ravitaillement en hydrogène

Le choix de la configuration appropriée s'effectue pendant la phase d'étude de faisabilité. Le tableau 3.6 présente les facteurs à évaluer pour sélectionner la configuration correcte.

Tableau 3.6 Facteurs à évaluer lors du choix de la configuration

Facteur	Importance
Disponibilité du réseau électrique	Détermine la méthode de raccordement
Ressource énergétique renouvelable	Influe sur le type de système
Demande en hydrogène	Détermine la capacité du système
Budget	Influe sur le choix technologique
Exigence de fiabilité	Détermine le besoin de stockage

Facteur	Importance
Conditions environnementales	Influent sur la sélection des composants

3.2.2. Logique de commande des systèmes d'électrolyse

La logique de commande sert à assurer un fonctionnement stable, sûr et efficace du système. Les techniciens peuvent configurer ou entretenir :

- la régulation de la tension ;
- la régulation du courant ;
- la surveillance de la température ;
- la régulation de la pression ;
- la gestion de la charge des batteries ;
- les systèmes d'arrêt d'urgence.

Exemple de logique de commande de base dans un système renouvelable autonome :

En cas de forte puissance solaire : l'électrolyseur fonctionne normalement tandis que l'énergie excédentaire recharge les batteries.

En cas de faible puissance solaire : la batterie fournit l'énergie de secours et la production de l'électrolyseur peut être automatiquement réduite.

En cas de faible niveau de charge de la batterie : le système déclenche un arrêt sûr.

Tableau 3.7 Comparaison des configurations d'électrolyse

Caractéristique	Autonome	Raccordée au réseau	Alimentée par renouvelables
Dépendance au réseau	Non	Oui	Facultative
Batterie requise	Oui	Généralement non	Parfois
Stabilité de l'alimentation	Moyenne	Élevée	Variable
Émissions de carbone	Faibles	Dépendent du réseau	Très faibles
Complexité	Moyenne	Moyenne	Élevée
Utilisation typique	Systèmes isolés	Industrie	Hydrogène vert

Lors de la conception ou de la maintenance des configurations d'électrolyse, il faut toujours :

- faire correspondre les valeurs nominales de tension et de courant ;

- utiliser des dispositifs de protection appropriés ;
- assurer une alimentation CC stable ;
- surveiller la température et la pression ;
- configurer les systèmes d'arrêt d'urgence.

En revanche, il ne faut jamais :

- raccorder directement le courant alternatif aux empilements d'électrolyseurs ;
- faire fonctionner le système sans régulation appropriée de la tension ;
- ignorer les fluctuations de puissance renouvelable ;
- contourner les systèmes de protection.

Points clés à retenir

- Les électrolyseurs nécessitent une alimentation CC stable.
- La configuration du système dépend de l'application et de la source d'électricité.
- Les systèmes autonomes utilisent des batteries et des convertisseurs CC-CC.
- Les systèmes raccordés au réseau utilisent des redresseurs et une correction du facteur de puissance.
- Les systèmes alimentés par des énergies renouvelables peuvent utiliser un couplage direct en CC ou des systèmes hybrides avec batterie.
- Le choix de la configuration fait partie de l'analyse de faisabilité.
- Une logique de commande appropriée améliore la sécurité, le rendement et la durée de vie des équipements.

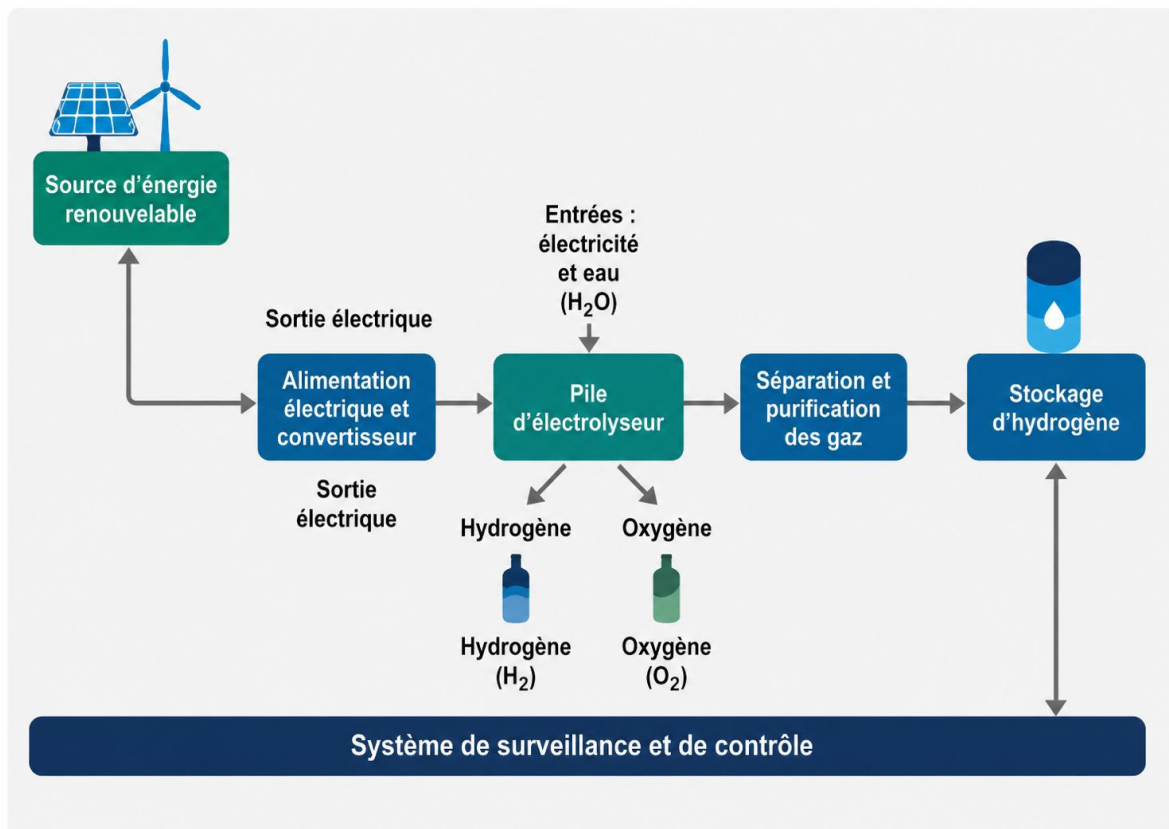


Figure 3.2 Schéma fonctionnel d'un système d'électrolyse

Questions pratiques

1. Expliquez la fonction d'un convertisseur CC-CC dans un système d'électrolyse autonome.
2. Pourquoi un redresseur est-il nécessaire dans les systèmes d'électrolyse raccordés au réseau ?
3. Comparez le couplage direct en CC et les systèmes d'électrolyse renouvelables hybrides.
4. Citez trois facteurs pris en compte lors du choix d'une configuration pendant la phase d'étude de faisabilité.
5. Expliquez pourquoi les batteries tampons sont importantes dans les systèmes autonomes.

3.3. Conception de la gestion thermique et de l'eau

Une gestion efficace de la chaleur et de l'eau est essentielle dans les systèmes électrochimiques et énergétiques tels que les piles à combustible, les batteries et les circuits de refroidissement. Une mauvaise gestion entraîne une surchauffe, une baisse de rendement, une dégradation des matériaux et une réduction de la durée de vie du système.

A. Conception de la gestion thermique

La gestion thermique contrôle la production et l'évacuation de la chaleur pendant le fonctionnement.

Principales sources de chaleur

- réactions électrochimiques ;
- pertes par résistance électrique ;
- frottements et pertes mécaniques.

Effets d'une mauvaise gestion thermique

- surchauffe des composants ;
- réduction du rendement énergétique ;
- vieillissement et dégradation accélérés ;
- contraintes thermiques et dommages aux matériaux ;
- risques pour la sécurité et arrêt du système.

Tableau 3.8 Méthodes pratiques de régulation thermique

Méthode	Application pratique
Refroidissement par air	Ventilateurs et conduits de ventilation
Refroidissement liquide	Canaux de liquide de refroidissement et échangeurs de chaleur
Dissipateurs thermiques	Évacuent la chaleur de l'électronique de puissance
Isolation thermique	Évite les transferts de chaleur indésirables

Méthode	Application pratique
Capteurs de température	Surveillance et protection en temps réel

Considérations de conception

- maintenir une répartition uniforme de la température ;
- éviter les points chauds ;
- sélectionner des matériaux présentant une bonne conductivité thermique ;
- garantir une capacité de refroidissement suffisante ;
- intégrer des systèmes automatiques de protection thermique.

B. Conception de la gestion de l'eau

La gestion de l'eau contrôle la production, la distribution et l'évacuation de l'eau à l'intérieur du système.

Tableau 3.9 Problèmes causés par une mauvaise gestion de l'eau

Situation	Effet
Excès d'eau (engorgement)	Bloque l'écoulement des gaz et réduit les performances
Quantité d'eau insuffisante (assèchement)	Endommage les membranes et réduit la conductivité
Répartition inégale de l'eau	Provoque un fonctionnement instable

Techniques pratiques de gestion de l'eau

- utiliser des canaux de drainage pour évacuer l'eau ;
- maintenir des niveaux d'humidité appropriés ;
- appliquer des systèmes d'humidification contrôlée ;
- concevoir des canaux d'écoulement efficaces ;
- installer des capteurs d'humidité et de pression.

Directives pratiques avancées

- maintenir simultanément une température et une humidité de fonctionnement optimales ;
- utiliser des systèmes de commande automatisés pour le refroidissement et l'équilibre hydrique ;
- inspecter régulièrement les pompes, les vannes et les passages de refroidissement ;
- surveiller les paramètres thermiques et hydriques à l'aide de capteurs numériques et d'automates programmables industriels (PLC).

Une bonne gestion thermique et de l’eau améliore le rendement, la fiabilité, la sécurité et la durée de service des systèmes énergétiques avancés.

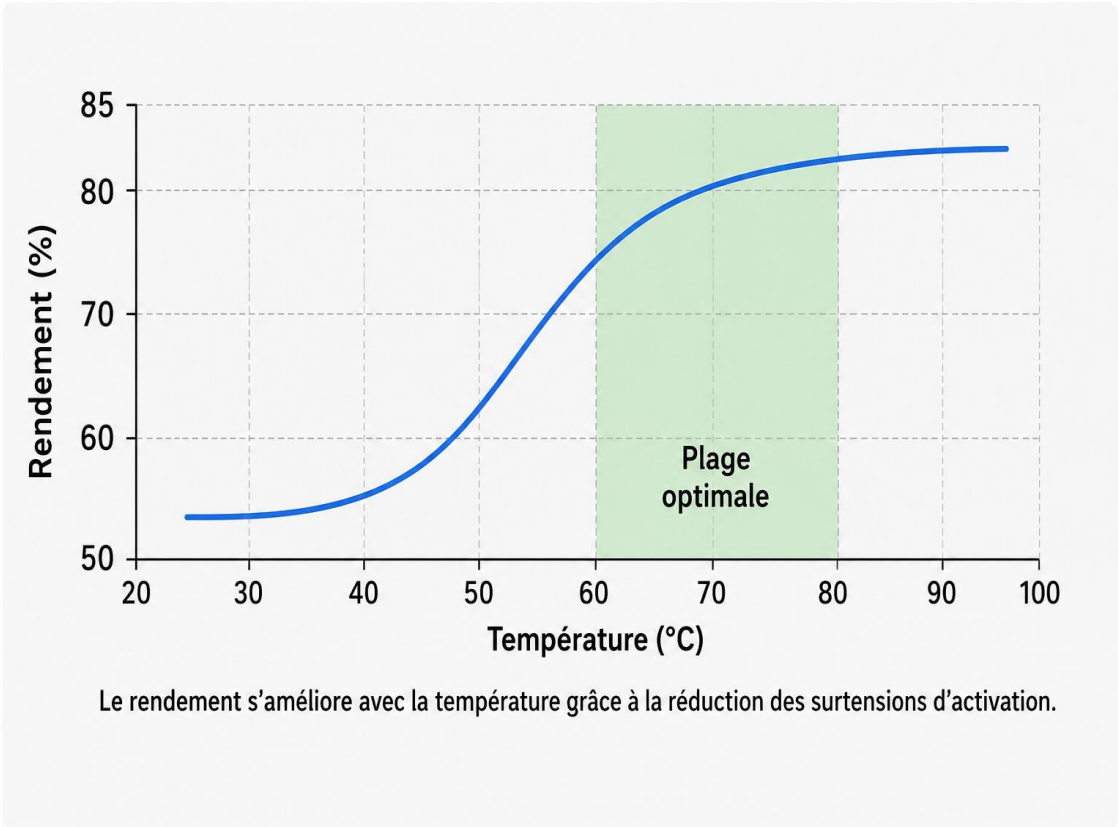


Figure 3.3 Rendement de l’électrolyseur en fonction de la température

Indication de la figure : le rendement augmente avec la température en raison de la diminution des surtensions.

Remarque : une température plus élevée améliore le rendement, mais il faut rester dans les limites du fabricant afin d’éviter d’endommager la membrane.

3.4. Modélisation du système d’électrolyse

La modélisation d’un système d’électrolyse permet de prévoir la production d’hydrogène, la consommation d’énergie et le rendement de fonctionnement avant l’installation des équipements. Elle contribue également à l’optimisation du système et à la réduction des coûts.

Objectifs de la modélisation de l’électrolyse

- prévoir la production du système ;
- estimer la consommation de puissance ;
- sélectionner une taille d’équipement adaptée ;
- optimiser les conditions de fonctionnement ;
- réduire les risques liés à la conception et à l’exploitation.

Tableau 3.10 Paramètres clés de la modélisation

Paramètre	Rôle
-----------	------

Paramètre	Rôle
Tension (V)	Détermine l'entrée électrique
Courant (A)	Contrôle le débit de production d'hydrogène
Température	Influe sur le rendement et la vitesse de réaction
Pression	Influe sur le stockage et l'écoulement du gaz
Concentration de l'électrolyte	Influe sur la conductivité
Rendement (%)	Mesure les performances du système

Modèle pratique simple : la production d'hydrogène est couramment estimée à l'aide de la loi de Faraday.

$$m = ItM / (nF)$$

où m est la masse d'hydrogène produite, I le courant, t le temps, M la masse molaire, n le nombre d'électrons et F la constante de Faraday.

Applications pratiques

- prévoir la production quotidienne d'hydrogène ;
- comparer le rendement à différentes températures ;
- optimiser l'utilisation de la puissance ;
- simuler les conditions de fonctionnement avant l'installation.

Conseils de conception et d'optimisation

- utiliser des logiciels ou des feuilles de calcul pour les calculs ;
- valider les résultats du modèle à partir de mesures réelles ;
- surveiller en continu la température et la tension de fonctionnement ;
- réduire au minimum les pertes d'énergie pendant l'exploitation.

La modélisation du système améliore la précision de la conception, le rendement d'exploitation et les décisions d'investissement dans les installations d'électrolyse.

3.5. Évaluation et optimisation des performances

L'évaluation des performances permet de vérifier que l'installation d'électrolyse fonctionne de manière efficace, sûre et économique au quotidien.

Objectifs de l'évaluation des performances

- détecter les pertes de rendement ;

- réduire les coûts d’exploitation ;
- améliorer la production d’hydrogène ;
- prévenir les défaillances des équipements ;
- maintenir un fonctionnement stable de l’installation.

Tableau 3.11 Principaux paramètres de performance

Paramètre	Importance
Débit de production d’hydrogène	Mesure la production du système
Consommation d’énergie (kWh/kg H ₂)	Indique le coût d’exploitation
Tension de cellule	Indique les performances électriques
Température	Prévient la surchauffe
Pression	Assure un débit de gaz stable
Rendement (%)	Évalue les performances globales du système

Méthodes pratiques d’optimisation

- maintenir la température de fonctionnement correcte ;
- utiliser une eau propre et correctement traitée ;
- étalonner régulièrement les capteurs et les instruments ;
- réduire la résistance électrique des connexions ;
- effectuer une maintenance préventive ;
- surveiller les données de performance à chaque poste.

Tableau 3.12 Problèmes courants en exploitation

Problème	Effet
Température élevée	Rendement réduit et dégradation plus rapide
Augmentation de la tension	Indique des pertes internes
Fuite de gaz	Risque pour la sécurité et perte de production
Mauvaise qualité de l’eau	Conductivité réduite et corrosion

Pratique de surveillance par poste

Les opérateurs doivent consigner :

- la production d'hydrogène ;
- la consommation électrique ;
- les relevés de température ;
- les valeurs de pression ;
- les alarmes et les défauts du système.

L'analyse des tendances permet d'identifier rapidement une baisse des performances. Une évaluation et une optimisation continues des performances augmentent le rendement, réduisent les temps d'arrêt et améliorent la rentabilité de l'installation.

3.6. Analyse de la dégradation et de la durée de vie

L'analyse de la dégradation et de la durée de vie permet de prévoir le vieillissement des équipements, de planifier la maintenance et d'estimer les coûts de remplacement des empilements dans les systèmes d'électrolyse.

Tableau 3.13 Signes courants de dégradation

Indicateur	Signification
Augmentation de la tension de cellule	Résistance interne plus élevée
Réduction de la production d'hydrogène	Rendement du système plus faible
Surchauffe	Mauvaises performances thermiques
Fuite de gaz	Endommagement du joint ou de la membrane
Traces de corrosion	Dégradation du matériau

Objectifs de l'analyse de la dégradation

- surveiller la diminution des performances dans le temps ;
- prévenir les défaillances inattendues du système ;
- améliorer la fiabilité d'exploitation ;
- planifier les calendriers de maintenance ;
- estimer le budget de remplacement de l'empilement.

Tableau 3.14 Causes courantes de dégradation et actions correctives

Cause de dégradation	Effet	Action corrective
Empoisonnement du catalyseur	Rendement de réaction réduit	Améliorer la pureté de l'eau et des gaz
Assèchement/fissuration de la membrane	Conductivité réduite et fuites	Réguler la température et l'humidité
Corrosion des plaques bipolaires	Pertes électriques et contamination	Utiliser des matériaux résistants à la corrosion
Contraintes thermiques	Fatigue et fissuration des matériaux	Maintenir une température de fonctionnement stable
Impuretés dans l'eau	Entartrage et corrosion	Utiliser de l'eau déionisée et filtrée

Méthodes pratiques de surveillance

- mesurer régulièrement la tension des cellules ;
- surveiller l'évolution de la production d'hydrogène ;
- inspecter les membranes et les plaques pendant la maintenance ;
- utiliser des capteurs pour surveiller la température et la pression ;
- conserver les registres de maintenance et d'exploitation.

Techniques d'amélioration de la durée de vie

- fonctionner dans la plage de température recommandée ;
- éviter les variations brusques de charge ;
- maintenir une humidité et un refroidissement appropriés ;
- utiliser une eau et des gaz de haute pureté ;
- effectuer régulièrement une maintenance préventive.

Une surveillance efficace de la dégradation prolonge la durée de vie du système, améliore sa fiabilité et réduit les coûts d'exploitation à long terme.

Stratégie de maintenance préventive à mettre en œuvre

- Chaque semaine : vérifier la tendance de la tension.
- Chaque mois : analyser la pureté et la qualité de l'eau.
- Chaque année : effectuer une inspection complète de l'empilement.

Activités pratiques / de mise en œuvre

Activité 1 – Exercice complet de dimensionnement du système : à partir d'un profil solaire et d'une demande de 500 kg H₂/jour, dimensionnez l'empilement, le redresseur et le système de refroidissement, puis estimez la production annuelle.

Activité 2 – Modélisation des performances : créez et exécutez un modèle Excel simple afin de tracer le rendement et la production pour différentes températures et différents courants.

Activité 3 – Diagnostic de dégradation : à partir de données de tension en fonction du temps, calculez le taux de dégradation et recommandez des actions de maintenance.

3.7. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les concepts fondamentaux d'ingénierie utilisés pour l'exploitation et la conception des systèmes d'électrolyse. La gestion thermique et la gestion de l'eau ont été étudiées comme des facteurs essentiels au maintien du rendement du système, à la prévention de la surchauffe et à la réduction de la dégradation des composants. Un refroidissement approprié, le contrôle de l'humidité et une bonne distribution de l'eau améliorent la stabilité d'exploitation et la durée de vie des équipements.

La modélisation des systèmes d'électrolyse a été présentée comme un outil pratique permettant de prévoir la production d'hydrogène, d'estimer la consommation d'énergie, de sélectionner les équipements et d'optimiser les conditions de fonctionnement avant l'installation. Des modèles mathématiques simples et des paramètres d'exploitation aident les ingénieurs à améliorer la précision de la conception et à réduire les risques opérationnels. L'évaluation et l'optimisation des performances ont porté sur la surveillance des principaux paramètres de fonctionnement, notamment la production d'hydrogène, la température, la tension, la pression et la consommation d'énergie. Une surveillance continue et une maintenance préventive contribuent à améliorer le rendement, à réduire les temps d'arrêt et à maintenir une exploitation économiquement viable.

Enfin, l'analyse de la dégradation et de la durée de vie a expliqué comment les composants des systèmes d'électrolyse se détériorent au fil du temps sous l'effet de l'empoisonnement des catalyseurs, de la dégradation des membranes, de la corrosion et des contraintes thermiques. La compréhension des mécanismes de dégradation aide les techniciens à planifier les opérations de maintenance, à améliorer la fiabilité et à gérer efficacement les coûts de remplacement des empilements. Dans l'ensemble, le chapitre a mis l'accent sur la maîtrise pratique de l'exploitation, la surveillance du système, l'amélioration du rendement et la planification de la maintenance dans les systèmes d'électrolyse avancés.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Dimensionnez un système d'électrolyse PEM pour produire 800 kg H₂/jour avec un facteur de charge de 75 %. Calculez la puissance d'entrée requise, le nombre estimé de cellules et la charge de refroidissement.
2. Recommandez une configuration adaptée à une installation d'électrolyse de 3 MW alimentée par l'éolien et justifiez votre choix de conception.
3. La température de l'empilement augmente tandis que le rendement du système diminue. Dressez la liste des causes probables et des vérifications que vous effectuerez.

4. Expliquez l'importance de la gestion thermique dans les systèmes d'électrolyse.
5. Décrivez deux effets d'une mauvaise gestion de l'eau sur les performances du système.
6. À l'aide de la loi de Faraday, expliquez comment le débit de production d'hydrogène est lié au courant.
7. Énumérez les principaux paramètres de fonctionnement surveillés pendant l'exploitation d'une installation d'électrolyse.
8. Expliquez comment l'évaluation des performances contribue à réduire les coûts d'exploitation.
9. Comparez les méthodes de refroidissement par air et de refroidissement liquide utilisées dans les systèmes d'électrolyse.
10. Identifiez les causes courantes de dégradation des systèmes d'électrolyse et proposez des actions correctives.
11. Expliquez comment l'assèchement de la membrane affecte les performances et la durée de vie du système d'électrolyse.
12. Décrivez le rôle des capteurs et des systèmes de commande dans la gestion thermique et la gestion de l'eau.
13. Pourquoi une eau de haute pureté est-elle importante dans les systèmes d'électrolyse ?
14. Expliquez comment l'analyse des tendances permet de détecter rapidement la dégradation des équipements.
15. Proposez des méthodes pratiques pour améliorer le rendement et la fiabilité d'un système d'électrolyse.

Systèmes d'hydrogène renouvelable et gestion de l'énergie

Durée estimée : 30 heures

- Théorie / discussion guidée : 10 heures
- Travaux pratiques en laboratoire / atelier / simulation : 16 heures
- Travail autonome et évaluation : 4 heures

Objectifs d'apprentissage

1. Concevoir et intégrer des systèmes solaires photovoltaïques (PV), éoliens et d'électrolyse en utilisant des méthodes de couplage et des stratégies de gestion de puissance adaptées.
2. Sélectionner l'électronique de puissance, les méthodes de commande et les techniques d'adaptation de charge appropriées pour gérer l'intermittence des sources d'énergie renouvelable.
3. Concevoir et représenter l'architecture d'un système énergétique hybride élémentaire solaire-éolien-batterie-hydrogène.
4. Intégrer et gérer les systèmes de stockage d'hydrogène et appliquer des outils de surveillance en temps réel pour la commande et l'optimisation des performances du système.
5. Réaliser une évaluation technique élémentaire de la faisabilité d'une installation d'hydrogène renouvelable, notamment des mesures d'atténuation de l'intermittence et de fiabilité d'exploitation.

4.1. Systèmes de production d'hydrogène alimentés par l'énergie solaire

Les systèmes d'hydrogène alimentés par l'énergie solaire utilisent l'énergie solaire photovoltaïque (PV) pour faire fonctionner des électrolyseurs destinés à la production d'hydrogène. Ces systèmes jouent un rôle important dans la production d'hydrogène propre et durable. La figure 4.1 illustre le système intégré solaire PV-hydrogène selon le cheminement suivant :

Étudier le flux de puissance : $PV \rightarrow \text{convertisseur} \rightarrow \text{électrolyseur} \rightarrow \text{stockage}$.

Le principal défi pratique consiste à gérer les variations de la puissance solaire par temps nuageux, le matin et le soir, ainsi que pendant les périodes nocturnes.

A. Principaux composants du système

Tableau 4.1 Composants d'un système d'hydrogène alimenté par solaire PV

Composant	Fonction
Champ solaire PV	Produit de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire
Électrolyseur	Produit de l'hydrogène à partir de l'eau

Composant	Fonction
Convertisseur / contrôleur de puissance	Régule la tension et le courant
Système de batteries	Stocke temporairement l'énergie électrique
Réservoir de stockage d'hydrogène	Stocke l'hydrogène produit

B. Méthodes de couplage CC et CA

1. Couplage CC : le champ PV alimente directement l'électrolyseur en courant continu (CC).

Avantages

- Rendement plus élevé
- Moins de pertes de conversion
- Bien adapté au fonctionnement direct de l'électrolyseur

Limites

- Moins flexible pour l'intégration au réseau
- Commande de puissance plus difficile

2. Couplage CA : la puissance PV est convertie en courant alternatif (CA) et raccordée par l'intermédiaire du réseau ou d'un système d'onduleur.

Avantages

- Intégration plus facile aux systèmes électriques existants
- Fonctionnement plus flexible
- Extension et commande plus faciles

Limites

- Rendement plus faible en raison des conversions supplémentaires
- Complexité accrue du système

C. Problèmes d'intermittence dans les systèmes solaires-hydrogène

La puissance solaire varie en fonction :

- de la couverture nuageuse ;
- du cycle jour-nuit ;
- des conditions météorologiques saisonnières.

Ces variations entraînent un fonctionnement instable de l'électrolyseur et une réduction de la production d'hydrogène.

D. Solutions pratiques à l’intermittence

Tableau 4.2 Solutions à l’intermittence en situation pratique

Solution	Objectif pratique
Champ PV surdimensionné	Maintient la puissance lorsque l’ensoleillement est faible
Système tampon par batterie	Stabilise les fluctuations de puissance à court terme
Électrolyseur PEM à large plage de fonctionnement	Permet le fonctionnement sous une puissance d’entrée variable

E. Considérations pratiques de conception

- Adapter la puissance PV aux besoins en puissance de l’électrolyseur.
- Utiliser des contrôleurs appropriés pour la régulation de la tension.
- Surveiller la température, la tension et la production d’hydrogène.
- Prévoir un stockage sûr de l’hydrogène et une ventilation adéquate.
- Installer des systèmes de protection contre les surcharges et les surtensions.

Une intégration correcte du solaire et de l’électrolyseur améliore le rendement de production d’hydrogène, la stabilité du système et l’utilisation des énergies renouvelables.

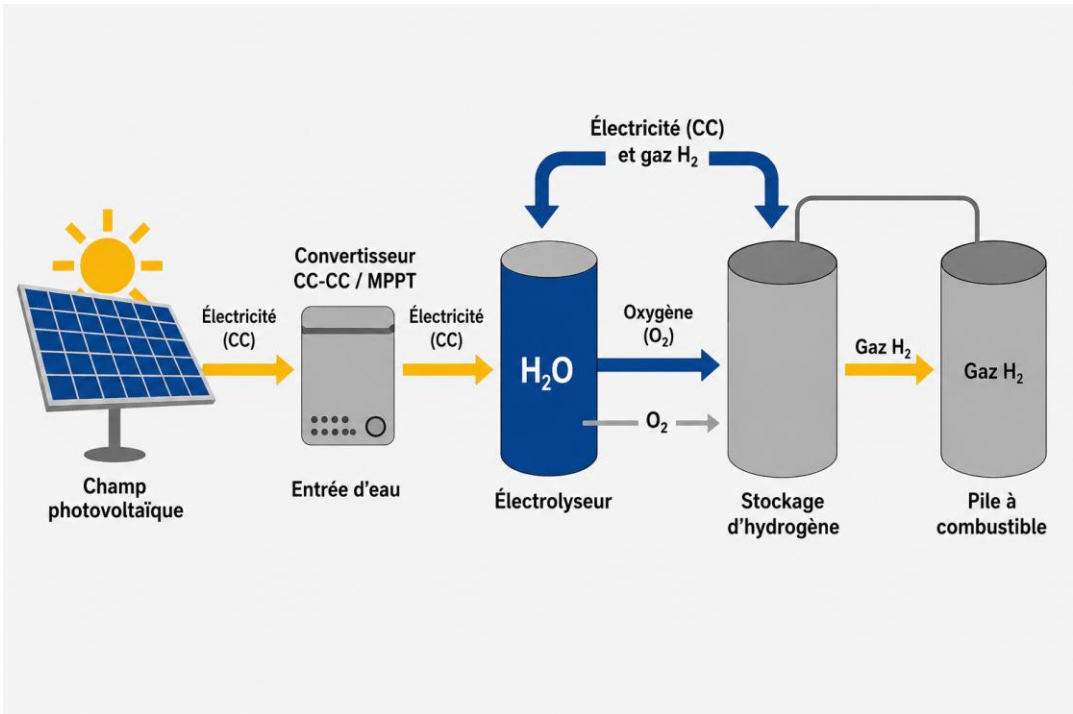


Figure 4.1 Système intégré solaire PV-hydrogène

4.2. Systèmes énergétiques éolien-hydrogène

Les systèmes éolien-hydrogène utilisent l'électricité produite par des éoliennes pour faire fonctionner des électrolyseurs destinés à la production d'hydrogène. La figure 4.2 présente un système de puissance éolien-hydrogène dans lequel l'électrolyseur agit comme une charge flexible. Ces systèmes permettent de stocker l'énergie éolienne excédentaire sous forme d'hydrogène pour une utilisation ultérieure et, par conséquent, de réduire l'écèlement de la production éolienne. Le principal défi d'exploitation consiste à gérer les variations rapides de vitesse du vent tout en protégeant l'électrolyseur et en maintenant un fonctionnement stable.

A. Principaux composants d'un système éolien-hydrogène

Tableau 4.3 Composants d'un système éolien-hydrogène

Composant	Fonction
Éolienne	Produit de l'énergie électrique à partir du vent
Contrôleur de puissance	Stabilise la tension et la puissance de sortie
Électrolyseur	Produit de l'hydrogène à partir de l'eau
Système de stockage d'hydrogène	Stocke l'hydrogène produit
Système de surveillance et de protection	Assure un fonctionnement sûr

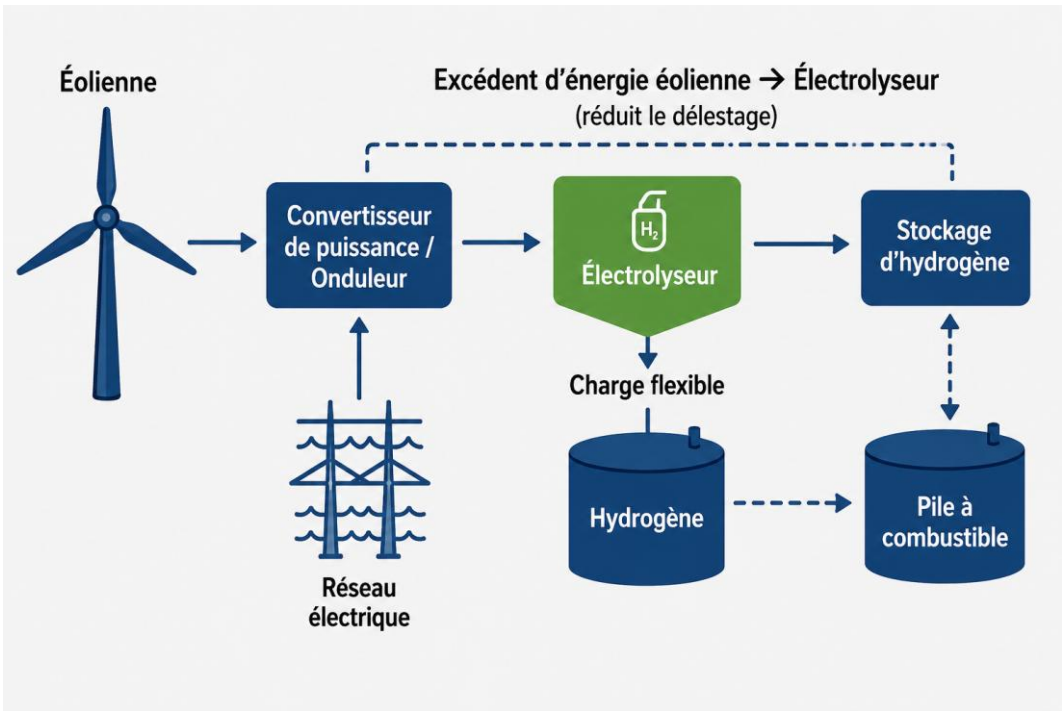


Figure 4.2 Système de puissance éolien-hydrogène

B. Caractéristiques de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est :

- variable ;
- intermittente ;
- difficile à prévoir en continu.

Cela entraîne :

- des fluctuations de puissance ;
- une instabilité de tension ;
- des variations brusques de charge dans l'électrolyseur.

C. Commandes pratiques du système

1. Commandes de lissage de puissance : utilisées pour réduire les variations brusques de puissance provenant des éoliennes.

Méthodes pratiques

- Tampon par batterie
- Convertisseurs de puissance
- Contrôleurs intelligents et systèmes PLC

Avantages

- Fonctionnement stable de l'électrolyseur
- Réduction des sollicitations sur les équipements
- Meilleure régularité de la production d'hydrogène

2. Hydrogène comme stockage d'énergie de longue durée

L'énergie éolienne excédentaire peut être convertie en hydrogène et stockée en vue d'une utilisation ultérieure.

Avantages

- Contribue à la stabilité du parc éolien
- Stocke l'excédent d'énergie renouvelable
- Fournit une énergie de secours pendant les périodes de faible vent

D. Liste de contrôle de sécurité et d'exploitation

Exigence de sécurité	Objectif
Système d'arrêt sûr de l'électrolyseur	Protège les équipements en cas de chute soudaine de la production éolienne
Protection contre les surtensions	Prévient les dommages électriques

Exigence de sécurité	Objectif
Surveillance de la pression	Assure la sécurité du stockage d'hydrogène
Système d'arrêt d'urgence	Améliore la sécurité d'exploitation
Surveillance continue	Détecte rapidement les conditions anormales

E. Considérations pratiques de conception

- Adapter la puissance de l'éolienne à la capacité de l'électrolyseur.
- Utiliser des systèmes de commande à réponse rapide.
- Maintenir une tension et une pression de fonctionnement stables.
- Inspecter régulièrement les éoliennes, les contrôleurs et les systèmes de stockage.
- Assurer une mise à la terre et une protection électrique appropriées.

Lorsqu'ils sont correctement commandés et protégés, les systèmes éolien-hydrogène améliorent l'utilisation de l'énergie renouvelable et assurent un stockage d'énergie efficace de longue durée.

4.3. Systèmes hybrides d'hydrogène renouvelable

Les systèmes hybrides d'hydrogène renouvelable combinent plusieurs sources et moyens de stockage, tels que le solaire, l'éolien, les batteries et le stockage d'hydrogène, afin d'assurer une production d'hydrogène stable et continue. Le document source indique que la plupart des installations industrielles d'hydrogène utilisent des systèmes hybrides afin d'améliorer la fiabilité, l'équilibre énergétique et le rendement global du système.

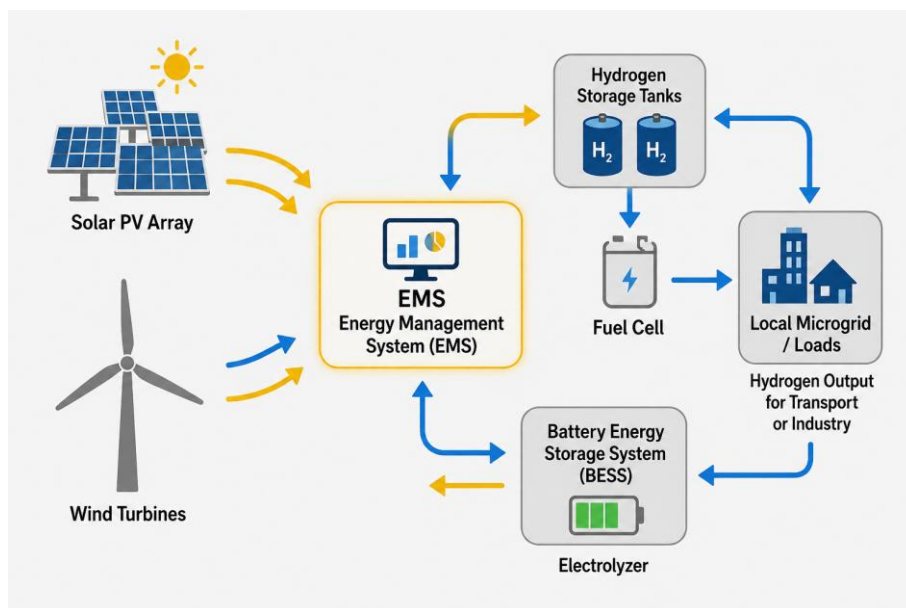


Figure 4.3 Architecture d'un système hybride d'hydrogène renouvelable

A. Principaux composants d'un système hybride

Tableau 4.4 Système hybride d'hydrogène renouvelable

Composant	Fonction
Système solaire PV	Produit de l'électricité pendant les heures d'ensoleillement
Éolienne	Produit de l'électricité à partir de l'énergie éolienne
Système de batteries	Stocke l'énergie électrique à court terme
Électrolyseur	Produit de l'hydrogène à partir de l'eau
Réservoir de stockage d'hydrogène	Stocke l'hydrogène pour une utilisation à long terme
Système de gestion de l'énergie	Commande les flux de puissance et le fonctionnement du système

B. Objectif des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont utilisés pour :

- réduire les fluctuations de puissance renouvelable ;
- améliorer la fiabilité du système ;
- augmenter la durée de production d'hydrogène ;
- équilibrer l'offre et la demande d'énergie ;
- réduire la dépendance à une seule source d'énergie.

C. Fonctionnement pratique du système

Lorsque la puissance solaire ou éolienne est élevée :

- l'électricité excédentaire alimente l'électrolyseur ;
- les batteries sont chargées ;
- une quantité supplémentaire d'hydrogène est stockée.

Lorsque la puissance renouvelable est faible :

- les batteries fournissent une alimentation de secours à court terme ;
- l'hydrogène stocké peut être utilisé ultérieurement pour fournir de l'énergie.

D. Avantages des systèmes hybrides renouvelables

Tableau 4.5 Avantages et bénéfices pratiques des systèmes hybrides renouvelables

Avantage	Bénéfice pratique
----------	-------------------

Avantage	Bénéfice pratique
Meilleure stabilité énergétique	Fonctionnement continu de l'électrolyseur
Meilleure utilisation des énergies renouvelables	Réduction du gaspillage énergétique
Fiabilité améliorée	Moins d'arrêts lors des changements météorologiques
Fonctionnement flexible	Disponibilité de plusieurs sources d'énergie

E. Considérations pratiques de conception

- Dimensionner correctement les systèmes solaires, éoliens et de batteries.
- Adapter la capacité de l'électrolyseur à la disponibilité de la puissance renouvelable.
- Utiliser des commandes automatisées de gestion de l'énergie.
- Surveiller l'état de charge des batteries, le niveau de stockage d'hydrogène et les flux de puissance.
- Assurer une intégration sûre de toutes les sources d'énergie.

F. Difficultés courantes d'exploitation

Tableau 4.5 Difficultés d'exploitation et solutions proposées

Difficulté	Solution
Fluctuations de puissance	Utiliser des batteries et des contrôleurs intelligents
Déséquilibre énergétique	Appliquer des stratégies de gestion de charge
Systèmes de commande complexes	Utiliser un PLC et des systèmes de surveillance numérique

Les systèmes hybrides d'hydrogène renouvelable assurent une production d'hydrogène plus stable, plus fiable et plus efficace en combinant plusieurs technologies d'énergie renouvelable et de stockage.

4.4. Systèmes de gestion de l'énergie et de commande

Les systèmes de gestion de l'énergie (EMS) commandent le fonctionnement des installations d'hydrogène renouvelable en gérant les flux de puissance entre le solaire PV, les éoliennes, les batteries, les électrolyseurs et les systèmes de stockage d'hydrogène. Le tableau 4.6 présente les fonctions de l'EMS et l'objectif de chacune.

L'EMS décide quand :

- démarrer ou arrêter l'électrolyseur ;
- charger ou décharger les batteries ;
- stocker l'hydrogène ;

- réduire ou écrêter l'excédent de puissance.

A. Objectif des systèmes de gestion de l'énergie

Tableau 4.6 Fonctions de l'EMS et objectifs

Fonction	Objectif
Équilibrage de puissance	Maintient un fonctionnement stable du système
Gestion de charge	Adapte l'offre de puissance à la demande
Protection du système	Prévient les surcharges et les dommages aux équipements
Optimisation des performances	Maximise le rendement de production d'hydrogène

B. Stratégies de commande courantes

1. Commande fondée sur des règles : le système fonctionne selon des conditions prédéfinies.

Exemple

- Si puissance PV > valeur requise → démarrer l'électrolyseur.
- Si la charge de la batterie est faible → réduire la charge de l'électrolyseur.
- Si le réservoir de stockage est plein → arrêter la production d'hydrogène.

Avantages

- fonctionnement simple ;
- programmation et maintenance faciles ;
- adaptée aux systèmes PLC industriels.

2. Surveillance et commande en temps réel : des capteurs surveillent en continu les paramètres du système et transmettent les données à l'EMS.

Tableau 4.7 Paramètres couramment surveillés

Paramètre	Importance
Tension	Stabilité électrique
Courant	Commande des flux de puissance
Débit d'hydrogène	Surveillance de la production
Pression	Sécurité du stockage

Paramètre	Importance
Température	Prévient la surchauffe

C. Composants pratiques de l'EMS

Tableau 4.8 Composants pratiques courants de l'EMS et leurs fonctions

Composant	Fonction
PLC / contrôleur	Exécute la logique de commande
Capteurs	Collectent les données de fonctionnement
Interface homme-machine (IHM)	Affiche l'état du système
Dispositifs de protection	Préviennent les défauts et les surcharges

D. Considérations pratiques de conception

- Assurer une communication stable entre les dispositifs.
- Utiliser des systèmes de protection à arrêt automatique.
- Maintenir un étalonnage approprié des capteurs.
- Enregistrer les données de fonctionnement pour l'analyse et le dépannage.
- Utiliser des alarmes pour les conditions de fonctionnement anormales.

E. Problèmes d'exploitation courants

Tableau 4.9 Problèmes d'exploitation courants et actions correctives proposées

Problème	Action corrective
Défaillance d'un capteur	Inspecter et réétalonner les capteurs
Instabilité de puissance	Améliorer la commande d'équilibrage de charge
Surchauffe	Vérifier le fonctionnement du système de refroidissement
Erreurs de communication	Inspecter le contrôleur et le câblage

Des systèmes de gestion de l'énergie et de commande correctement conçus améliorent le rendement, la sécurité d'exploitation et la fiabilité des installations d'hydrogène renouvelable.

Activité pratique : utiliser un logiciel de simulation (HOMER Pro ou un script Python simple) pour tester différentes stratégies de commande.

4.5. Intégration du stockage d'hydrogène

L'intégration du stockage d'hydrogène consiste à sélectionner et à gérer des systèmes de stockage adaptés à l'application finale, à la durée de stockage et aux exigences de sécurité. Le tableau 4.10 présente des méthodes courantes de stockage de H₂ ainsi que l'application pratique de chacune.

Tableau 4.10 Méthodes courantes de stockage de H₂

Méthode de stockage	Application pratique
Stockage de gaz comprimé	Applications industrielles et véhicules
Stockage d'hydrogène liquide	Stockage d'énergie à grande échelle
Stockage par hydrures métalliques	Systèmes de petite taille et portables

Considérations pratiques de conception

- Adapter le type de stockage à la demande de l'usage final.
- Assurer une régulation appropriée de la pression et de la température.
- Installer des systèmes de détection des fuites et de sécurité.
- Intégrer le stockage au fonctionnement de l'EMS et de l'électrolyseur.

Exigences de sécurité

- Utiliser des systèmes de ventilation appropriés.
- Surveiller la pression en continu.
- Installer des dispositifs d'arrêt d'urgence.
- Respecter les normes de sécurité relatives à la manipulation de l'hydrogène.

Une intégration correcte du stockage d'hydrogène améliore la fiabilité du système, la sécurité d'exploitation et la disponibilité de l'énergie. Le tableau 4.11 présente les types de stockage avec le paramètre spécifique à gérer et les cas d'usage.

Tableau 4.11 Types de stockage, paramètres spécifiques à gérer et cas d'usage

Type de stockage	Pression / température	Cas d'usage privilégié	Éléments à gérer
Comprimé	200–700 bar	Transport, industrie	Compresseurs, bouteilles, contrôle des fuites

Type de stockage	Pression / température	Cas d'usage privilégié	Éléments à gérer
Liquide	-253 °C	Grand volume, longue distance	Réservoirs cryogéniques, gestion du gaz d'évaporation
Hydruure métallique	Basse pression	Stationnaire, applications critiques pour la sécurité	Gestion thermique pendant la charge

Activités de mise en œuvre

Activité 1 – Concevoir une installation hybride hydrogène solaire + éolien de 2 MW pour un site isolé en Éthiopie. Tracer le schéma-blocs, dimensionner les principaux composants et choisir la méthode de couplage.

Activité 2 – À l'aide du modèle Excel ou HOMER fourni, tester différentes stratégies EMS et calculer la production annuelle d'hydrogène ainsi que l'écêtement.

Activité 3 – Pour trois scénarios d'usage final, sélectionner la méthode de stockage et préparer une liste élémentaire de contrôle de sécurité et d'inspection.

4.6. Résumé

Ce chapitre a présenté les systèmes de production d'hydrogène renouvelable alimentés par des sources solaires, éoliennes et hybrides. Les systèmes solaires-hydrogène utilisent l'énergie PV pour faire fonctionner les électrolyseurs, tandis que les systèmes éolien-hydrogène gèrent la variabilité de la puissance éolienne au moyen de méthodes de commande et de stockage. Les systèmes hybrides combinent le solaire, l'éolien, les batteries et le stockage d'hydrogène afin d'améliorer la fiabilité et de permettre une production d'hydrogène plus continue.

Le chapitre a également expliqué l'importance des systèmes de gestion de l'énergie et de commande pour équilibrer les flux de puissance, commander les électrolyseurs, charger les batteries et surveiller les performances du système. Enfin, l'intégration du stockage d'hydrogène a été introduite, en mettant l'accent sur la sélection de méthodes de stockage adaptées, la sécurité de fonctionnement et l'adéquation des systèmes de stockage aux besoins de l'usage final.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Tracer un schéma-blocs et préciser la méthode de couplage pour une installation hydrogène comprenant 1,5 MW de solaire PV + 0,8 MW d'éolien.
2. Estimer la production quotidienne d'hydrogène d'un système solaire recevant une puissance moyenne de 800 kW et présentant une consommation énergétique spécifique de 58 kWh/kg.
3. Un électrolyseur s'arrête fréquemment pendant des journées partiellement nuageuses. Proposer trois améliorations pratiques.
4. Comparer le couplage CC et le couplage CA pour les systèmes d'hydrogène renouvelable.
5. Énumérer les principales fonctions d'un système de gestion de l'énergie (EMS) dans une installation hybride d'hydrogène.

6. Expliquer comment le stockage par batterie améliore le fonctionnement de l'électrolyseur lors des fluctuations de puissance solaire ou éolienne.
7. Comparer le stockage d'hydrogène comprimé, d'hydrogène liquide et par hydrures métalliques selon l'application pratique.
8. Proposer des stratégies d'optimisation permettant d'améliorer la production d'hydrogène dans un système hybride solaire-éolien-batterie.

Analyse technico-économique, applications industrielles et tendances émergentes

Objectifs d'apprentissage de ce chapitre

1. Analyser l'économie des installations d'électrolyse : décomposer et calculer les principaux postes de coûts (CAPEX, OPEX, électricité, eau), calculer et interpréter le coût actualisé de l'hydrogène (LCOH) pour différentes configurations de système, et comparer la faisabilité économique des technologies AEL, PEMEL et SOEC.
2. Évaluer la durabilité environnementale et l'impact en CO₂ : réaliser une évaluation environnementale élémentaire et quantifier les économies de CO₂ d'un projet d'hydrogène vert.
3. Identifier des applications adaptées et justifier leur utilisation : recommander des applications industrielles appropriées de l'hydrogène et les justifier d'un point de vue à la fois technique et économique.
4. Appliquer les principes et référentiels de sécurité de l'hydrogène : appliquer les principaux référentiels de sécurité de l'hydrogène et concevoir des zones de sécurité élémentaires pour une installation.
5. Intégrer les connaissances pour la planification et l'étude de faisabilité d'un projet : identifier et évaluer les technologies et tendances émergentes, puis élaborer un rapport de faisabilité élémentaire combinant les aspects coûts, performances, sécurité et durabilité.

Terminologie clé (glossaire pratique)

- CAPEX (Capital Expenditure) : dépenses d'investissement (investissement initial).
- OPEX (Operational Expenditure) : dépenses d'exploitation (coûts de fonctionnement).
- LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) : coût actualisé de l'hydrogène (\$/kg), indicateur économique clé.
- Part du coût de l'électricité : généralement 60 à 80 % du coût total de l'H₂.
- LCA (Life Cycle Assessment) : analyse du cycle de vie (ACV).
- ATEX / IECEx : référentiels relatifs aux équipements et installations utilisés en atmosphères explosives dans les zones hydrogène.
- Taux d'évaporation (boil-off rate) : perte d'hydrogène liquide due à l'évaporation.

5.1. Analyse des coûts de production d'hydrogène

L'analyse des coûts de production d'hydrogène aide les techniciens et les ingénieurs à estimer les dépenses d'une installation, à évaluer la faisabilité d'un projet et à identifier les possibilités d'optimisation des performances et des coûts. La figure 5.1 présente la répartition des coûts de production d'hydrogène. Ce diagramme circulaire peut être utilisé lors de la présentation des budgets de projet. Une attention particulière est accordée au coût de l'électricité, car c'est sur ce poste que les contrats d'achat d'électricité renouvelable (Power Purchase Agreements, PPA) peuvent offrir les économies les plus importantes. Dans les installations d'hydrogène renouvelable, le coût de l'électricité constitue le facteur économique le plus important.

Tableau 5.1 Principaux postes de coûts de la production d'hydrogène

Poste de coût	Importance pratique
Coût de l'électricité	Principal coût d'exploitation
CAPEX	Investissement initial de l'installation
OPEX	Dépenses quotidiennes d'exploitation
Coût de l'eau	Intrant d'exploitation faible mais nécessaire

A. Coût de l'électricité

L'électricité représente environ 60 à 80 % du coût total de production de l'hydrogène.

Pourquoi ce poste est-il important ?

- Les électrolyseurs consomment de grandes quantités d'énergie électrique.
- Le coût de l'hydrogène augmente lorsque le prix de l'électricité augmente.

Les méthodes pratiques de réduction des coûts consistent notamment à utiliser une énergie renouvelable à faible coût, à améliorer le rendement de l'électrolyseur et à fonctionner pendant les périodes où la disponibilité d'électricité renouvelable est élevée.

B. Dépenses d'investissement (CAPEX)

Le CAPEX correspond à l'investissement initial nécessaire à la construction de l'installation d'hydrogène. Les principaux éléments de CAPEX sont présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Principaux éléments de CAPEX

Composant	Contribution
Stack d'électrolyseur	Coût majeur des équipements
Systèmes auxiliaires de l'installation (BoP)	Pompes, refroidissement, tuyauteries, commandes

Selon le document source, le CAPEX représente couramment 40 à 60 % de l'investissement total du projet.

C. Dépenses d'exploitation (OPEX)

L'OPEX comprend les coûts réguliers d'exploitation et de maintenance, c'est-à-dire les coûts de fonctionnement. Les postes OPEX courants comprennent :

- maintenance et réparations
- traitement de l'eau

- coût de la main-d'œuvre
- pièces de rechange
- systèmes de surveillance et de commande

D. Besoins en eau

L'électrolyse nécessite de l'eau purifiée pour produire de l'hydrogène. La consommation pratique d'eau est d'environ 1 à 1,5 L d'eau par Nm³ de H₂. Parmi les considérations importantes :

- utiliser une eau propre et traitée
- surveiller régulièrement la qualité de l'eau
- prévenir l'entartrage et la contamination

E. Méthodes pratiques d'optimisation des coûts

- Améliorer l'efficacité énergétique
- Réduire les temps d'arrêt du système
- Recourir à la maintenance préventive
- Intégrer une électricité renouvelable à faible coût
- Optimiser les programmes d'exploitation

Une analyse correcte des coûts contribue à améliorer la rentabilité de l'installation, l'efficacité de l'exploitation et la planification des investissements dans les systèmes d'hydrogène renouvelable.

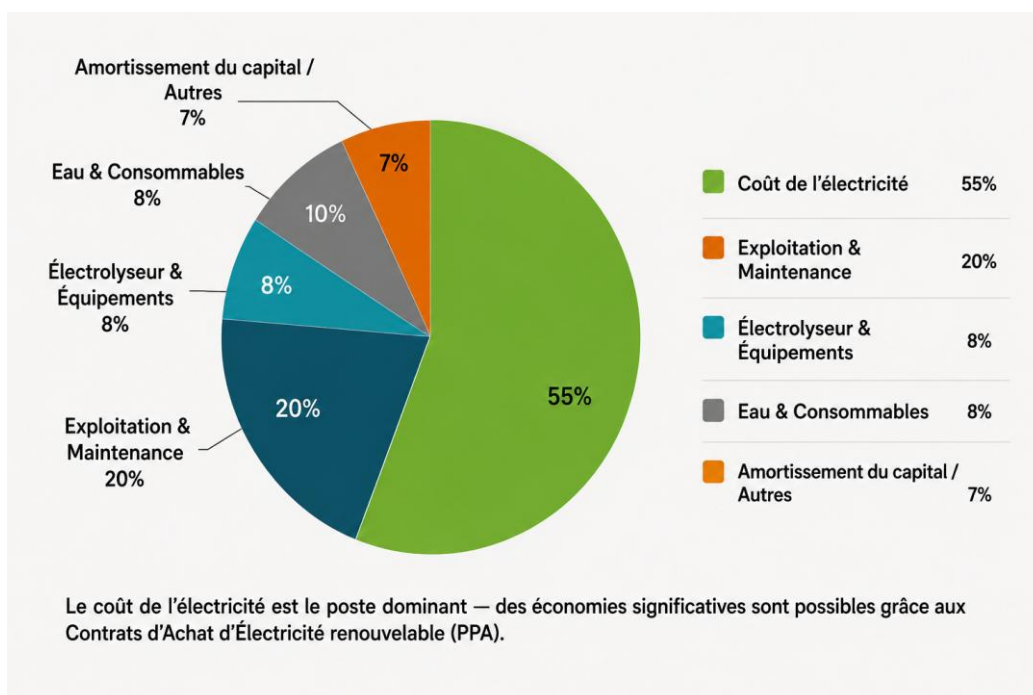


Figure 5.1 Répartition des coûts de production d'hydrogène

5.2. Analyse des coûts de production d'hydrogène

L'analyse des coûts de production d'hydrogène sert à déterminer si un projet hydrogène est économiquement viable. Le principal indicateur économique utilisé est le coût actualisé de l'hydrogène (LCOH). Le LCOH indique le coût moyen de production de 1 kg d'hydrogène sur toute la durée de vie de l'installation.

Expression pratique simplifiée du LCOH :

$$\text{LCOH (\$/kg)} = \text{Coût total annualisé} / \text{Production annuelle de H}_2 \text{ (kg)}$$

Tableau 5.3 Principaux facteurs influençant le LCOH

Facteur	Effet sur le coût
Prix de l'électricité	Impact le plus important sur le LCOH
Rendement de l'électrolyseur	Un rendement plus élevé réduit le coût
Heures de fonctionnement de l'installation	Une production plus importante réduit le coût unitaire
Coût de maintenance	Augmente les dépenses d'exploitation
Disponibilité des énergies renouvelables	Affecte la production d'hydrogène

C. Étapes de l'analyse des coûts

1. Calculer le coût annuel d'exploitation
2. Estimer la production annuelle d'hydrogène
3. Déterminer le coût d'investissement annualisé
4. Appliquer la formule du LCOH
5. Comparer les résultats au prix de marché de l'hydrogène

D. Méthodes pratiques de réduction des coûts

- Utiliser une électricité renouvelable à faible coût
- Augmenter le temps de fonctionnement de l'électrolyseur
- Améliorer le rendement du système
- Réduire les arrêts de maintenance
- Optimiser la gestion énergétique de l'installation

E. Importance de l'analyse du LCOH

- Appuie les décisions d'investissement
- Aide à comparer différentes technologies
- Identifie les possibilités de réduction des coûts

- Évalue la rentabilité du projet

Un LCOH plus faible indique un système de production d'hydrogène plus compétitif et économiquement durable. La figure 5.2 compare les coûts de production d'hydrogène selon la technologie.

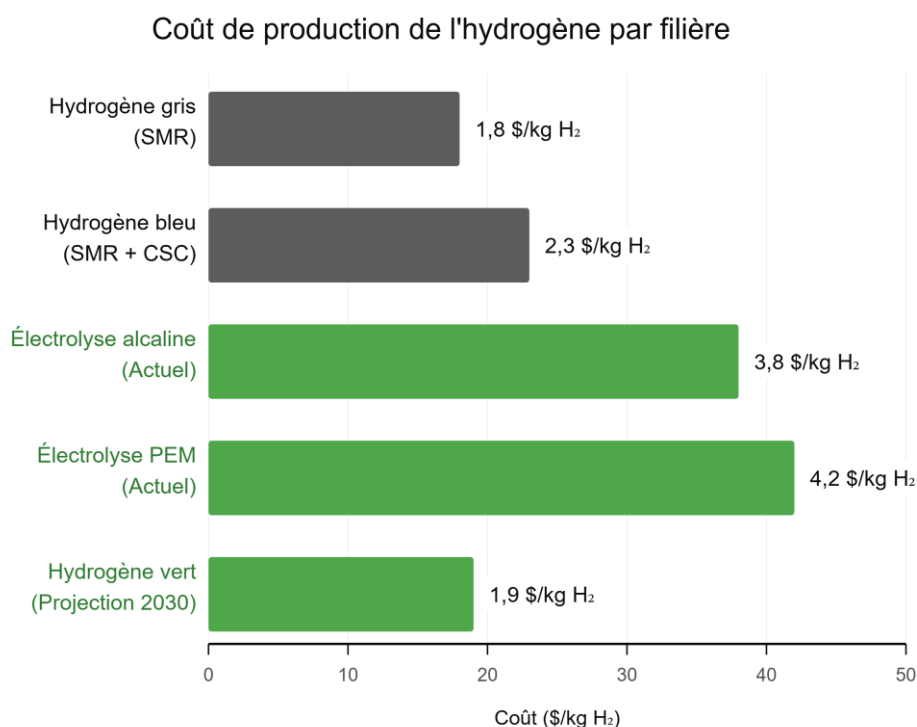


Figure 5.2 Comparaison des coûts de production d'hydrogène selon la technologie

Remarque : selon le document source, l'hydrogène vert présente un coût initial plus élevé, mais devient compétitif à long terme grâce aux PPA renouvelables.

5.3. Évaluation environnementale et de la durabilité

L'évaluation environnementale et de la durabilité permet de mesurer l'impact environnemental des systèmes de production d'hydrogène. Elle aide les ingénieurs et techniciens à préparer les rapports de projet, à demander les autorisations et à être admissibles à des programmes de financement vert. L'hydrogène vert produit à partir d'énergies renouvelables présente de très faibles émissions de carbone par rapport à la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles. Le tableau 5.3 présente les principales valeurs de performance environnementale de l'hydrogène vert et de l'hydrogène gris en matière d'émissions de CO₂.

Tableau 5.3 Niveaux d'émissions de CO₂ de l'hydrogène vert et gris

Type d'hydrogène	Niveau d'émissions de CO ₂
Hydrogène vert	Environ 0 à 2 kg CO ₂ /kg H ₂
Hydrogène gris	Environ 9 à 12 kg CO ₂ /kg H ₂

Selon le document source, l'hydrogène vert peut éviter jusqu'à 10 tonnes d'émissions de CO₂ pour chaque tonne d'hydrogène produite par rapport aux méthodes conventionnelles.

Principaux bénéfices environnementaux de l'hydrogène vert

- réduction des émissions de gaz à effet de serre
- diminution de la dépendance aux combustibles fossiles
- meilleure utilisation des énergies renouvelables
- contribution aux objectifs de transition vers une énergie propre

Considérations pratiques

- Utiliser des sources d'électricité renouvelable
- Surveiller l'efficacité énergétique du système
- Réduire au minimum le gaspillage d'eau et d'énergie
- Maintenir des systèmes d'exploitation et de stockage sûrs sur le plan environnemental

L'évaluation environnementale permet de démontrer la durabilité et les bénéfices climatiques des projets d'hydrogène renouvelable.

5.4. Applications industrielles de l'hydrogène

L'hydrogène est largement utilisé dans les transports, la production d'électricité et l'industrie manufacturière comme vecteur énergétique propre et comme matière première industrielle. Les techniciens et ingénieurs accompagnent les industries dans l'intégration des systèmes hydrogène à leurs activités.

Tableau 5.4 Principales applications industrielles

Secteur	Application pratique
Transports	Camions, autobus et navires à pile à combustible
Production d'électricité	Piles à combustible et mélange d'hydrogène pour l'alimentation de secours
Industries chimiques	Production d'ammoniac et de méthanol, et procédés de raffinage
Sidérurgie	Réduction directe du minerai de fer (DRI) utilisant de l'hydrogène vert

Bénéfices pratiques de l'utilisation de l'hydrogène

- Réduit les émissions de carbone
- Soutient l'intégration des énergies renouvelables
- Améliore la durabilité industrielle
- Fournit des solutions de remplacement propres aux combustibles classiques

L'hydrogène joue un rôle important dans la décarbonation des transports, des systèmes énergétiques et des industries lourdes.

5.5. Normes et réglementations de sécurité de l'hydrogène

La sécurité n'est pas négociable. Vous mettrez en œuvre et auditez les systèmes de sécurité.

Principaux dangers à maîtriser

- Large plage d'inflammabilité (4 à 75 % dans l'air)
- Fuites à haute pression
- Flamme invisible

Liste de contrôle pratique à utiliser

- Installer des détecteurs de gaz à plusieurs hauteurs.
- Veiller à l'utilisation d'équipements conformes aux exigences ATEX dans les zones dangereuses.
- Tester chaque mois les systèmes d'arrêt d'urgence.

5.6. Tendances émergentes et technologies futures

Vous évalueriez les nouvelles technologies en vue de futures modernisations ou de nouveaux projets. La figure 5.3 présente l'écosystème futur de l'économie de l'hydrogène et montre comment une installation s'insère dans une chaîne plus large, de la production aux usages finaux.

Tendances à surveiller

- SOEC à haute température (très haut rendement).
- Production d'hydrogène en mer (éolien + électrolyse de l'eau de mer).
- Intelligence artificielle (IA) pour la maintenance prédictive et l'optimisation.
- Stockage LOHC à grande échelle et stockage souterrain.

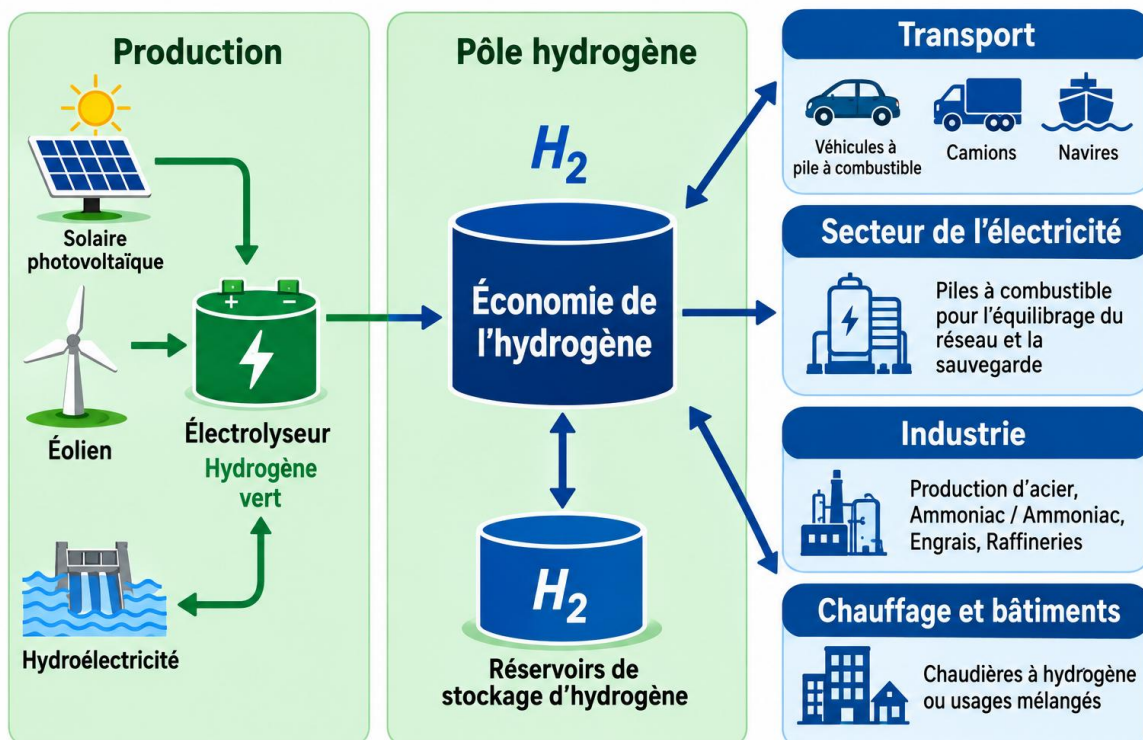


Figure 5.3 Écosystème futur de l'économie de l'hydrogène

Activités pratiques / de mise en œuvre

Activité 1 – Calculer le LCOH pour trois scénarios présentant des prix de l'électricité et des technologies différents.

Activité 2 – Concevoir des zones de sécurité pour une installation de 1 MW et s'exercer aux procédures de détection des fuites.

Activité 3 – Préparer un court rapport pour un projet d'hydrogène vert de 10 MW comprenant les coûts, les applications et la sécurité.

5.5. Résumé du chapitre

Le chapitre 5 traite des aspects économiques, environnementaux et technologiques des systèmes énergétiques à hydrogène. Il explique l'analyse des coûts des méthodes de production d'hydrogène et souligne comment l'hydrogène vert devient plus compétitif à mesure que progressent les technologies d'énergie renouvelable. Le chapitre examine également les bénéfices environnementaux et la durabilité de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique propre capable de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il présente en outre les principales applications de l'hydrogène dans les transports, l'industrie et le stockage de l'énergie. Le chapitre insiste également sur l'importance des normes et réglementations de sécurité de l'hydrogène pour assurer une production, un stockage et un transport sûrs. Enfin, il passe en revue les tendances émergentes et les technologies futures qui devraient améliorer l'efficacité, l'accessibilité économique et l'adoption mondiale de l'hydrogène dans la transition vers des systèmes énergétiques durables.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Décomposer les principaux postes de coûts (CAPEX, OPEX, électricité et eau) et calculer le coût actualisé de l'hydrogène (LCOH) pour une installation d'électrolyse de 3 MW à l'aide des données fournies. Interpréter les résultats et discuter les principaux facteurs qui influencent le plus le LCOH.
2. Comparer l'électrolyse alcaline (AEL) et l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEMEL) pour une utilisation dans une usine de fabrication de produits chimiques. Prendre en compte les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation, le rendement, la flexibilité et l'adéquation à l'application. Recommander une technologie et justifier le choix.
3. Une alarme de fuite d'hydrogène se déclenche pendant la nuit dans l'installation d'électrolyse. Présenter une procédure d'intervention d'urgence claire et étape par étape, comprenant les actions immédiates, les considérations de sécurité et les notifications.
4. Recommander au moins trois applications industrielles adaptées à l'hydrogène vert et justifier chaque recommandation d'un point de vue technique et économique. Prendre en compte la possibilité de changement d'échelle, les exigences de pureté et les solutions concurrentes.
5. Réaliser une évaluation environnementale élémentaire pour un projet d'hydrogène vert de 5 MW. Quantifier les économies annuelles potentielles de CO₂ par rapport à la production d'hydrogène gris et discuter les autres impacts environnementaux à prendre en compte.

6. Identifier deux technologies ou tendances émergentes importantes dans la production d'hydrogène vert.
Présenter ensuite la structure et les principales sections d'un rapport de faisabilité élémentaire pour un projet d'hydrogène vert, en intégrant les performances économiques, la sécurité, les bénéfices environnementaux et la capacité d'adaptation aux évolutions futures.

H2-A2

Transport, stockage et infrastructures de ravitaillement en hydrogène

Vue d'ensemble du cours

Ce cours permet aux apprenants de niveau avancé de l'enseignement et de la formation techniques et professionnels (EFTP) d'acquérir des compétences pratiques et techniques relatives au transport, au stockage, à la distribution et aux infrastructures de ravitaillement en hydrogène. Il porte sur les technologies de manipulation de l'hydrogène, les systèmes de transport, les méthodes de stockage, les procédés de compression et de liquéfaction, la conception des stations de ravitaillement, les normes de sécurité et les pratiques d'exploitation. Une attention particulière est accordée aux applications industrielles, à l'intégration des infrastructures et à l'exploitation pratique des systèmes.

Acquis d'apprentissage du cours

1. Expliquer les principes du transport et du stockage de l'hydrogène.
2. Comparer différentes technologies de stockage et méthodes de transport de l'hydrogène.
3. Concevoir des infrastructures de base pour le transport et le ravitaillement en hydrogène.
4. Analyser les systèmes de compression et de liquéfaction de l'hydrogène.
5. Appliquer les normes de sécurité et les procédures d'exploitation dans les infrastructures hydrogène.
6. Évaluer les performances des infrastructures et leur efficacité opérationnelle.
7. Réaliser des opérations élémentaires de maintenance et de dépannage.

H2-A2-1

Fondamentaux du transport et du stockage de l'hydrogène

Objectifs d'apprentissage du chapitre

1. Sélectionner des matériaux et des paramètres de conception adaptés aux systèmes de transport et de stockage de l'hydrogène sur la base de ses propriétés essentielles.
2. Établir la cartographie d'une chaîne d'approvisionnement en hydrogène et identifier les goulets d'étranglement aux étapes de transport et de stockage pour une application donnée.
3. Comparer et recommander des modes de transport (pipeline, semi-remorque porte-tubes, hydrogène liquide, transport maritime) pour des volumes, des distances et des usages finaux spécifiques.
4. Évaluer et dimensionner de manière élémentaire des solutions de stockage sous forme de gaz comprimé, de liquide ou de solutions alternatives en utilisant des paramètres pratiques.
5. Appliquer les codes pertinents et des règles pratiques relatives aux distances de sécurité, aux pressions nominales et à la compatibilité des matériaux dans les décisions d'exploitation.

Termes clés

Gaz d'évaporation (BOG - Boil-off Gas) : perte par vaporisation dans les systèmes d'hydrogène liquide.

Fragilisation par l'hydrogène : dégradation des matériaux due à la diffusion de l'hydrogène.

Densité énergétique volumique : énergie stockée par unité de volume, paramètre essentiel pour le transport et le stockage.

Semi-remorque porte-tubes (tube trailer) : ensemble de bouteilles haute pression monté sur un camion pour le transport d'hydrogène gazeux.

Réservoir de type IV : réservoir sous pression entièrement composite avec liner polymère, couramment utilisé pour le stockage à 350/700 bar.

PCI / LHV : pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène (~120 MJ/kg).

MAWP : pression maximale admissible en service (Maximum Allowable Working Pressure).

Compatibilité cryogénique : aptitude d'un matériau à conserver des performances adaptées aux températures de l'hydrogène liquide (~-253 °C).

1.1. Propriétés de l'hydrogène pertinentes pour le transport et le stockage

L'hydrogène prend une importance croissante dans les systèmes d'énergie propre, la production d'engrais, les procédés industriels, la production d'électricité, les activités minières et les transports durables. Ses propriétés physiques et chimiques posent toutefois des défis d'ingénierie spécifiques que les techniciens et les professionnels de l'industrie doivent comprendre avant d'intervenir sur des équipements hydrogène.

Dans des conditions atmosphériques standard, l'hydrogène gazeux présente une très faible masse volumique, d'environ 0,084 à 0,09 kg/m³, ce qui le rend près de 14 fois plus léger que l'air. En raison de cette faible masse volumique, de grands volumes de stockage sont nécessaires, sauf si le gaz est comprimé à haute pression (350 à 700 bar) ou transformé en hydrogène liquide à température cryogénique. L'hydrogène possède également un pouvoir calorifique inférieur (PCI/LHV) élevé, d'environ 120 MJ/kg, ce qui en fait un excellent vecteur énergétique pour les piles à combustible, le chauffage industriel et le stockage d'énergie renouvelable malgré sa faible densité énergétique volumique. Dans les systèmes d'hydrogène liquide, le point d'ébullition est extrêmement bas, à -252,8 °C, ce qui nécessite une isolation cryogénique avancée et des technologies de stockage spécialisées. Ces systèmes deviennent notamment pertinents pour les futurs corridors d'exportation d'hydrogène, les ports industriels et les projets d'énergie renouvelable en Afrique.

La gestion de la sécurité de l'hydrogène est essentielle, car le gaz possède une large plage d'inflammabilité de 4 à 75 % dans l'air et une énergie minimale d'inflammation extrêmement faible, d'environ 0,02 mJ. Même de petites fuites peuvent s'enflammer facilement dans des espaces insuffisamment ventilés. Les ingénieurs et techniciens doivent donc mettre en œuvre des méthodes efficaces de détection des fuites, des systèmes de ventilation, des dispositifs de décharge de pression ainsi que des procédures d'exploitation rigoureuses.

Un autre enjeu majeur d'ingénierie est la fragilisation par l'hydrogène : l'hydrogène affaiblit certains métaux et peut provoquer des fissures ou des ruptures sous pression. Les systèmes hydrogène doivent donc utiliser des matériaux de construction compatibles, tels que les aciers inoxydables austénitiques, les alliages d'aluminium, certains aciers au carbone spécifiquement traités et des matériaux composites avancés.

Exemple 1.1 - Augmentation de la pression due à une hausse de température

Une semi-remorque porte-tubes équipée de réservoirs de type IV est remplie à 350 bar à 15 °C, puis stationnée en plein soleil, où la température atteint 45 °C. Estimer la nouvelle pression (en utilisant l'approximation de la loi de Gay-Lussac à volume constant, adaptée aux vérifications approximatives).

Solution

$$P_2 = P_1 \times (T_2 / T_1)$$

Températures en kelvins : $T_1 = 15 + 273 = 288 \text{ K}$; $T_2 = 45 + 273 = 318 \text{ K}$

$$P_2 = 350 \times (318 / 288) \approx 350 \times 1,104 = 386,4 \text{ bar}$$

Décision pratique : la MAWP du réservoir est généralement indiquée dans la source comme étant de 1,2 à 1,5 fois la pression de conception. Les opérateurs doivent surveiller la température et peuvent devoir recourir à des stratégies de décharge de pression ou de refroidissement. Pour les travaux précis, toujours utiliser des abaques de gaz réels.

Normes pertinentes :

- ASME B31.12 (tuyauteries et pipelines d'hydrogène).
- Série ISO 19880 (stations de ravitaillement en hydrogène gazeux).

1.2. Vue d'ensemble de la chaîne d'approvisionnement en hydrogène

La production d'hydrogène vert en Afrique de l'Ouest devrait progresser parallèlement au développement de grands projets solaires, éoliens et hydroélectriques dans des pays tels que le Ghana, le Nigeria, le Sénégal, la Mauritanie et la Côte d'Ivoire. Une chaîne d'approvisionnement type commence par la production d'électricité renouvelable et l'électrolyse, puis se poursuit par la compression ou la liquéfaction de l'hydrogène, le stockage en vrac, le transport, la distribution et l'utilisation finale dans l'industrie ou les transports. La figure 1.1 illustre la production, la compression, le stockage, le transport, le ravitaillement et les applications finales, afin d'aider les apprenants à comprendre l'ensemble du réseau d'infrastructure hydrogène.

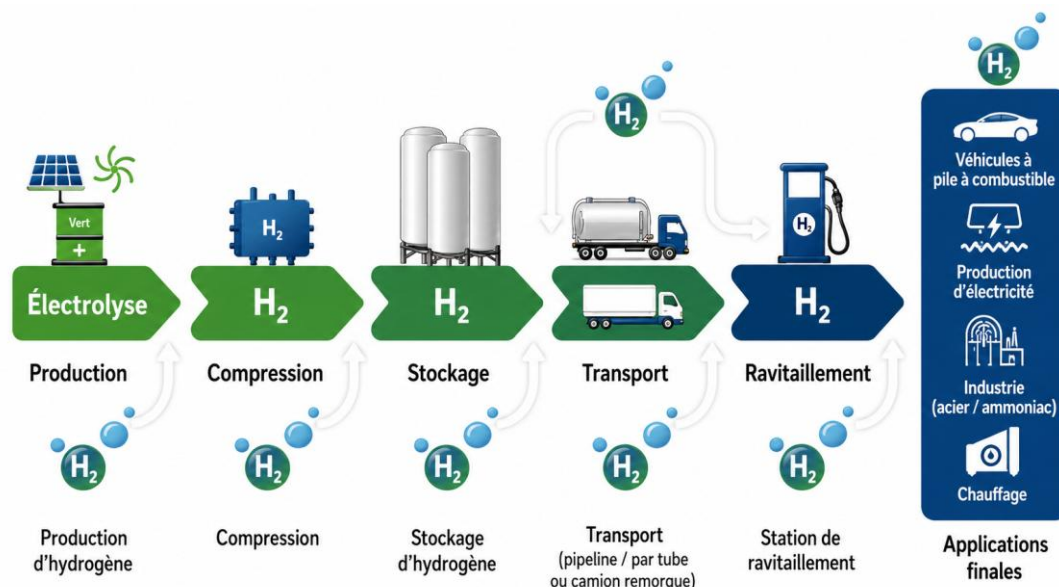


Figure 1.1 Chaîne d'approvisionnement en hydrogène

La chaîne suit généralement les étapes suivantes :

- 1. Production d'énergie renouvelable** - des centrales solaires, des parcs éoliens ou des centrales hydroélectriques fournissent l'électricité nécessaire à l'électrolyse.
- 2. Production d'hydrogène (électrolyse)** - l'eau est dissociée en hydrogène et oxygène à l'aide d'électrolyseurs.
- 3. Compression ou liquéfaction** - l'hydrogène est préparé pour le stockage et le transport par augmentation de la pression ou conversion sous forme liquide.
- 4. Stockage et transport** - l'hydrogène est stocké dans des réservoirs, des bouteilles ou des installations souterraines, ou transporté par pipelines, semi-remorques porte-tubes, rail ou navires.
- 5. Distribution et utilisation finale** - l'hydrogène est fourni aux installations industrielles, stations de ravitaillement, opérations minières, unités de production d'engrais, systèmes électriques ou véhicules à pile à combustible.

En Afrique de l'Ouest, les principaux défis de la chaîne d'approvisionnement comprennent :

- des infrastructures de transport limitées pour la livraison d'hydrogène sur de longues distances ;
- le coût élevé des systèmes de compression et de stockage ;
- des conditions climatiques chaudes qui influent sur l'efficacité du stockage et la durabilité des équipements ;
- des capacités locales de fabrication d'équipements hydrogène limitées ;
- des lacunes en matière de sécurité et de conformité aux normes dans les marchés de l'hydrogène émergents.

Les grands utilisateurs industriels tels que les usines d'engrais, les raffineries de pétrole, les cimenteries, les installations sidérurgiques et les exploitations minières peuvent privilégier une production centralisée d'hydrogène avec transport par pipeline ou sous forme d'hydrogène liquide. À l'inverse, les sites isolés et les

applications de transport - notamment les autobus, les camions, les équipements portuaires et les véhicules miniers - peuvent bénéficier d'une production d'hydrogène sur site associée à un stockage tampon local.

Applications industrielles ciblées - Afrique de l'Ouest

Secteur minier : les camions miniers à pile à combustible peuvent réduire la dépendance au diesel dans les zones minières isolées du Ghana, de la Guinée et du Mali.

Ports et logistique : l'hydrogène vert peut soutenir des systèmes de transport à faibles émissions dans de grands ports tels que Tema, Lagos, Abidjan et Dakar.

Agriculture et production d'engrais : l'hydrogène peut être utilisé pour produire de l'ammoniac vert destiné à soutenir la fabrication régionale d'engrais.

Électrification rurale : des systèmes de stockage d'hydrogène de petite taille peuvent stabiliser les mini-réseaux renouvelables des communautés hors réseau.

Démonstration / observation industrielle

Observer un système de stockage ou d'alimentation en hydrogène (visite d'un site physique, simulation ou démonstration vidéo) et suivre le parcours de l'hydrogène depuis le point de production ou de livraison jusqu'à l'équipement d'utilisation finale ou au distributeur. Identifier :

- la méthode de stockage utilisée ;
- les composants de sécurité installés ;
- les systèmes de régulation de pression ;
- le circuit de distribution.

Exercice

Une entreprise minière isolée d'Afrique de l'Ouest a besoin de 500 kg/jour d'hydrogène pour faire fonctionner des tombereaux à pile à combustible. Dessiner une chaîne d'approvisionnement simple faisant apparaître :

- la source d'énergie ;
- la méthode de production d'hydrogène ;
- le système de stockage ;
- le mode de transport ;
- le point d'application final.

Puis identifier :

1. le principal défi de stockage ;
2. le principal défi de transport ;
3. une amélioration pratique adaptée aux conditions d'Afrique de l'Ouest.

Normes et références industrielles

- ISO 19870 - méthodologie de détermination des émissions de gaz à effet de serre dans les chaînes d'approvisionnement en hydrogène.

- ISO 19880-1 - exigences de sécurité pour les stations de ravitaillement en hydrogène gazeux.
- ISO 14687 - spécifications de qualité de l'hydrogène pour les applications à pile à combustible.

1.3. Modes de transport de l'hydrogène

Le transport efficace de l'hydrogène constitue une partie essentielle de la chaîne de valeur de l'hydrogène. La figure 1.2 présente les principaux modes de transport - pipelines, semi-remorques porte-tubes, citernes, citernes d'hydrogène liquide et transport maritime. Le choix dépend :

- de la quantité d'hydrogène requise par jour ;
- de la distance entre le site de production et le site d'utilisation finale ;
- des infrastructures disponibles ;
- des exigences de sécurité ;
- du coût d'exploitation ;
- du type d'utilisateur final (installation industrielle, station de ravitaillement, exploitation minière, port ou système électrique).

En Afrique de l'Ouest, les systèmes de transport de l'hydrogène doivent également tenir compte de l'état des routes, des infrastructures portuaires, des conditions climatiques, de l'accès à l'énergie et des difficultés logistiques sur de longues distances.



Figure 1.2 Modes de transport de l'hydrogène

a) Transport par pipeline

Les pipelines d'hydrogène constituent, selon le texte source, l'option la plus efficace pour transporter en continu de grands volumes d'hydrogène sur des distances courtes à moyennes. Ils sont couramment utilisés pour relier les installations de production d'hydrogène à des utilisateurs industriels tels que les usines d'engrais, les raffineries, les aciéries et les centrales de production d'électricité.

Les pipelines d'hydrogène fonctionnent généralement à des pressions comprises entre 20 et 100 bar selon la conception du système et les exigences de débit. Des gazoducs existants peuvent parfois être convertis au service de l'hydrogène ; les matériaux doivent cependant être évalués avec soin, car l'hydrogène peut provoquer :

- la fragilisation des métaux ;
- des fuites au niveau des joints ;
- des fissures de fatigue ;
- des pertes accrues par perméation.

Le dimensionnement d'un pipeline implique des calculs portant sur :

- le débit ;
- la perte de charge ;
- le diamètre de la conduite ;
- les besoins de compression ;
- les pertes d'énergie.

Des équations d'écoulement des gaz adaptées sont utilisées, car l'hydrogène se comporte différemment du gaz naturel en raison de sa faible masse moléculaire et de sa forte diffusivité.

Le transport par pipeline pourrait prendre de l'importance en Afrique de l'Ouest dans :

- les grappes industrielles proches des ports ;
- les zones de production d'engrais et d'ammoniac ;
- les corridors miniers et de transformation ;
- les projets d'infrastructures énergétiques transfrontalières.

Les pays qui développent leurs infrastructures gazières, comme le Nigeria et le Sénégal, pourraient envisager l'injection d'hydrogène dans des réseaux de pipelines existants après évaluation technique.

b) Transport par semi-remorque porte-tubes

Les semi-remorques porte-tubes transportent de l'hydrogène gazeux comprimé dans des bouteilles haute pression montées sur camion. La plupart des systèmes modernes utilisent des bouteilles composites de type IV fonctionnant entre 200 et 500 bar. La capacité de transport type varie de 300 à 1 200 kg d'hydrogène par semi-remorque, selon la pression et la conception du véhicule.

Les semi-remorques porte-tubes conviennent :

- aux distances inférieures à 500 km ;
- aux besoins en hydrogène faibles à moyens ;
- aux stations de ravitaillement ;
- aux projets pilotes sur l'hydrogène ;
- aux sites industriels isolés.

Avantages

- Déploiement flexible ;

- Coût initial d'infrastructure plus faible ;
- Installation rapide sur les marchés émergents.

Limites

- Rendement massique de transport plus faible ;
- Fréquence élevée des trajets pour les fortes demandes ;
- Risques liés au transport routier et coûts de carburant.

Les semi-remorques porte-tubes sont susceptibles de dominer les premières phases des marchés de l'hydrogène en Afrique de l'Ouest, car les infrastructures de pipelines sont limitées, la logistique routière est déjà courante et la demande initiale en hydrogène devrait être décentralisée.

Cette méthode peut desservir :

- les flottes d'autobus à hydrogène ;
- les exploitations minières ;
- les équipements portuaires ;
- les projets industriels de démonstration.

c) Transport d'hydrogène liquide (LH₂)

Le transport de l'hydrogène liquide utilise des citernes cryogéniques conçues pour maintenir des températures extrêmement basses, d'environ -253°C . Par rapport au transport de gaz comprimé, l'hydrogène liquide offre une densité énergétique volumique plus élevée, des charges utiles de transport plus importantes et un nombre réduit de trajets de livraison.

- La capacité des citernes cryogéniques varie généralement de 3 500 litres à plus de 50 000 litres.
- Selon le texte source, l'hydrogène liquide permet de transporter environ 2 à 4 fois plus d'hydrogène par unité de volume que les systèmes à gaz comprimé.

Les systèmes d'hydrogène liquide présentent cependant d'importants défis techniques :

- forte consommation d'énergie pour la liquéfaction ;
- exigences d'isolation cryogénique ;
- pertes de gaz d'évaporation (BOG) ;
- procédures spécialisées de maintenance et de sécurité.

Les pertes de gaz d'évaporation typiques indiquées dans le texte source se situent entre 0,2 % et 1 % par jour.

Le transport d'hydrogène liquide pourrait devenir important en Afrique de l'Ouest pour :

- les terminaux d'exportation ;
- les grands utilisateurs industriels ;
- les chaînes d'approvisionnement régionales sur de longues distances ;
- les systèmes d'alimentation en combustible maritime.

Les conditions climatiques chaudes d'Afrique de l'Ouest peuvent accentuer les difficultés de gestion du BOG et les coûts de réfrigération.

d) Transport maritime de l'hydrogène

Le transport maritime est essentiel au commerce international de l'hydrogène et aux chaînes d'approvisionnement industrielles côtières. L'hydrogène peut être transporté par mer sous plusieurs formes :

a) Navires transporteurs d'hydrogène liquide : l'hydrogène est transporté sous forme de liquide cryogénique dans des navires spécialement isolés.

b) Ammoniac comme vecteur d'hydrogène : l'hydrogène est chimiquement converti en ammoniac (NH_3), plus facile à transporter et à stocker en utilisant les infrastructures existantes de transport maritime des engrais et produits chimiques.

c) Vecteurs liquides organiques d'hydrogène (LOHC) : l'hydrogène est lié chimiquement à des liquides vecteurs puis libéré à destination par des procédés de déshydrogénation.

Le transport maritime nécessite :

- des terminaux spécialisés ;
- des systèmes de manipulation cryogénique ou chimique ;
- le respect des exigences internationales de sécurité ;
- des installations de stockage portuaire.

Les pays côtiers d'Afrique de l'Ouest, tels que la Mauritanie, le Sénégal, le Ghana, le Nigeria et la Côte d'Ivoire, disposent d'un fort potentiel pour devenir de futurs exportateurs d'hydrogène vert et d'ammoniac vert grâce à l'abondance de leurs ressources renouvelables et à leur accès stratégique aux ports.

Exercice

Une entreprise de distribution d'hydrogène doit livrer 10 tonnes/jour d'hydrogène sur une distance de 300 km. Comparer :

1. Le nombre approximatif de trajets nécessaires en utilisant :

- des semi-remorques porte-tubes à 350 bar ;
- des citernes d'hydrogène liquide.

2. Quel mode de transport est susceptible d'être le plus rentable ?

3. Quelle méthode serait la plus adaptée à :

- un projet minier ;
- un réseau de stations de ravitaillement ;
- une usine d'engrais ?

Démonstration / activité industrielle

Observer ou simuler :

- un système de chargement de semi-remorque porte-tubes ;
- l'exploitation d'une citerne cryogénique ;
- une station de compression de pipeline.

Identifier :

- la pression de fonctionnement ;
- les systèmes de sécurité ;
- la procédure de transfert de l'hydrogène ;
- les méthodes de prévention des fuites ;
- les systèmes d'arrêt d'urgence.

Normes et références industrielles

- CSA B342 - sélection et utilisation de bouteilles, sphères, tubes et autres récipients pour le transport de marchandises dangereuses.
- ASME B31.12 - systèmes de tuyauterie et pipelines d'hydrogène.
- IGF Code - Code international de sécurité applicable aux navires utilisant des gaz ou autres combustibles à faible point d'éclair.
- ISO 16111 - dispositifs de stockage de gaz transportables pour les applications hydrogène.

1.4. Technologies de stockage de l'hydrogène en Afrique de l'Ouest

Le stockage de l'hydrogène est l'un des éléments techniques et économiques les plus importants de la chaîne de valeur de l'hydrogène. Comme l'hydrogène possède une très faible densité naturelle, il doit être stocké au moyen de technologies spécialisées qui améliorent la densité énergétique, la sécurité et l'efficacité du transport. La sélection d'un système de stockage dépend :

- de la quantité d'hydrogène requise ;
- de la durée de stockage ;
- des conditions de pression et de température ;
- du caractère mobile ou stationnaire de l'application ;
- des exigences de sécurité ;
- des infrastructures disponibles ;
- des coûts et des considérations de maintenance.

En Afrique de l'Ouest, les systèmes de stockage doivent également tenir compte :

- des températures ambiantes élevées ;
- d'infrastructures de refroidissement limitées ;
- des difficultés de fiabilité de l'alimentation électrique ;
- de la logistique des transports ;
- des possibilités de développement industriel ;
- de la disponibilité des compétences techniques.

a. Stockage de l'hydrogène gazeux comprimé

Le stockage d'hydrogène comprimé est la technologie de stockage la plus répandue pour les stations de ravitaillement, les systèmes industriels et les véhicules à pile à combustible. Le gaz est comprimé puis stocké dans des bouteilles ou réservoirs haute pression, fonctionnant couramment à 350 bar pour les transports lourds

et les applications industrielles, et à 700 bar pour les véhicules particuliers à pile à combustible et le stockage à haute densité en station.

Les réservoirs modernes sont généralement :

- de type III - bouteilles composites avec liner métallique ;
- de type IV - bouteilles entièrement composites avec liner polymère, plus légères et présentant une résistance accrue à la corrosion.

Les systèmes à gaz comprimé sont couramment utilisés dans :

- les systèmes de stockage en cascade des stations de ravitaillement ;
- les semi-remorques porte-tubes ;
- les systèmes d'alimentation de secours ;
- les réseaux industriels d'approvisionnement en hydrogène.

Avantages

- Technologie mature et disponible dans le commerce ;
- Capacité de charge et de décharge rapide ;
- Installation modulaire flexible ;
- Adaptée aux systèmes mobiles et stationnaires.

Limites

- Emprise au sol importante à forte capacité ;
- Besoins énergétiques élevés pour la compression ;
- Fatigue cyclique due aux remplissages et vidanges répétés ;
- Risques liés aux hautes pressions.

Le stockage comprimé devrait dominer les premières phases du déploiement de l'hydrogène en Afrique de l'Ouest parce qu'il nécessite moins d'infrastructures spécialisées que l'hydrogène liquide, est plus facile à installer sur des sites décentralisés et convient aux projets pilotes, aux systèmes de mobilité et aux démonstrations industrielles.

Les applications potentielles comprennent :

- les dépôts d'autobus à hydrogène ;
- le ravitaillement des véhicules miniers ;
- les systèmes de secours à énergie renouvelable ;
- les équipements portuaires et logistiques.

b. Stockage d'hydrogène liquide (LH₂)

Le stockage de l'hydrogène liquide consiste à refroidir l'hydrogène jusqu'à environ -253 °C et à le stocker dans des réservoirs cryogéniques isolés sous vide. Les réservoirs sont généralement :

- cylindriques ;
- à double paroi ;
- isolés sous vide ;

- équipés de dispositifs de décharge de pression et de systèmes de gestion du gaz d'évaporation.

L'hydrogène liquide offre une densité énergétique volumique nettement supérieure à celle du stockage de gaz comprimé, ce qui le rend intéressant pour :

- les grandes installations industrielles ;
- les terminaux d'exportation ;
- le transport sur de longues distances ;
- les applications aérospatiales et de transport lourd.

Avantages

- Densité de stockage élevée ;
- Emprise physique réduite ;
- Efficace pour les fortes demandes en hydrogène ;
- Fréquence de transport plus faible pour de grands volumes.

Limites

- Coût d'investissement très élevé ;
- Procédé de liquéfaction énergivore ;
- Pertes de gaz d'évaporation (BOG) ;
- Systèmes complexes de maintenance cryogénique et de sécurité.

Le gaz d'évaporation est généralement géré par :

- une évacuation contrôlée ;
- une reliquéfaction ;
- une réutilisation dans des procédés à proximité.

Les systèmes d'hydrogène liquide pourraient devenir importants en Afrique de l'Ouest pour les pôles d'exportation, les zones industrielles côtières, les grandes exploitations minières et les chaînes d'approvisionnement maritimes en hydrogène. Les températures ambiantes élevées augmentent toutefois les besoins de réfrigération et les difficultés liées au gaz d'évaporation.

c. Stockage de l'hydrogène par hydrures métalliques

Le stockage par hydrures métalliques est une technologie de stockage solide dans laquelle l'hydrogène est absorbé chimiquement par des alliages métalliques.

L'hydrogène est stocké dans des conditions de :

- pressions plus faibles ;
- températures modérées ;
- niveau de sécurité élevé.

Pendant le fonctionnement :

- la charge en hydrogène libère de la chaleur ;
- la décharge de l'hydrogène nécessite un apport de chaleur.

Une gestion thermique efficace est donc essentielle.

Avantages

- Très bonnes performances de sécurité ;
- Faible pression de fonctionnement ;
- Stockage compact pour certaines applications ;
- Risque de fuite réduit.

Limites

- Systèmes de stockage lourds ;
- Matériaux d'alliage coûteux ;
- Vitesses de charge/décharge lentes ;
- Gestion thermique complexe.

Les hydrures métalliques sont principalement utilisés dans :

- les systèmes stationnaires de secours ;
- les systèmes portables à hydrogène ;
- des applications industrielles spécialisées ;
- les technologies de recherche et de défense.

En Afrique de l'Ouest, les systèmes à hydrures métalliques peuvent convenir à :

- de petits systèmes de stockage d'énergie renouvelable ;
- des laboratoires d'enseignement et de recherche ;
- des projets de démonstration d'énergie rurale ;
- des applications d'alimentation de secours pour les télécommunications.

d. Stockage souterrain de l'hydrogène

Le stockage souterrain de l'hydrogène est destiné au stockage à très grande échelle et de longue durée.

L'hydrogène peut être stocké dans :

- des cavernes salines ;
- des gisements de pétrole et de gaz épuisés ;
- des formations géologiques profondes.

Ces systèmes sont conçus pour :

- le stockage saisonnier d'énergie ;
- les réserves nationales d'hydrogène ;
- l'équilibrage du réseau ;
- la stabilisation de l'approvisionnement de grandes installations industrielles.

Principales considérations techniques

- besoins en gaz tampon (cushion gas) ;
- gestion de la pureté du gaz ;

- intégrité géologique ;
- prévention des fuites ;
- contrôle de la pression du réservoir.

Avantages

- Très grande capacité de stockage ;
- Faible coût de stockage par kilogramme ;
- Capacité de stockage de longue durée ;
- Adapté aux systèmes énergétiques nationaux.

Limites

- Coût initial de développement élevé ;
- Contraintes géologiques ;
- Long délai de développement du projet ;
- Systèmes de surveillance complexes.

Les pays d'Afrique de l'Ouest disposant d'infrastructures pétrolières et gazières, de formations salines ou de champs d'hydrocarbures épuisés, tels que le Nigeria et le Sénégal, pourraient étudier le stockage souterrain de l'hydrogène dans le cadre de futures économies de l'hydrogène à grande échelle.

Exercice

Une station de ravitaillement en hydrogène nécessite un stockage tampon de 200 kg d'hydrogène. Comparer :

1. un système de stockage de gaz comprimé à 700 bar ;
2. un système de stockage d'hydrogène liquide.

Pour chaque option, estimer :

- l'emprise de stockage approximative ;
- les principaux équipements nécessaires ;
- les considérations de sécurité ;
- les difficultés d'exploitation attendues.

Puis recommander l'option la plus adaptée pour :

- une station de ravitaillement d'autobus urbains ;
- un site minier ;
- un terminal côtier d'exportation.

Démonstration / observation industrielle

Observer ou simuler :

- un stockage d'hydrogène haute pression en cascade ;
- un réservoir cryogénique d'hydrogène liquide ;
- une opération de remplissage de bouteilles d'hydrogène.

Identifier :

- les dispositifs de régulation de pression ;
- les soupapes de décharge ;
- les systèmes de détection de fuites ;
- les méthodes d'isolation ;
- les systèmes d'arrêt d'urgence ;
- les zones de dégagement de sécurité.

Normes et références industrielles

- ISO 19880 - stations de ravitaillement en hydrogène gazeux et exigences de sécurité.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII - règles de conception et de construction des appareils sous pression.
- NFPA 2 - code des technologies de l'hydrogène pour le stockage, la manipulation et l'utilisation.
- ISO 11119 - bouteilles à gaz et récipients sous pression composites.
- ISO 13985 - réservoirs d'hydrogène liquide pour véhicules terrestres.

1.5. Résumé du chapitre

Le stockage et le transport de l'hydrogène sont des composantes essentielles de la chaîne de valeur, car l'hydrogène possède une très faible densité et nécessite des systèmes de manipulation spécialisés, tels que le stockage à haute pression ou les technologies cryogéniques. Des opérations sûres et fiables dépendent du choix approprié des matériaux, de la prévention des fuites, de la gestion de la pression et de la maîtrise de la fragilisation par l'hydrogène. Les techniciens et ingénieurs doivent comprendre l'influence des systèmes de stockage et de transport sur le coût du projet, la sécurité et l'efficacité opérationnelle.

La sélection des technologies de transport et de stockage dépend de facteurs tels que la demande quotidienne en hydrogène, la distance de transport, les infrastructures disponibles et l'application de l'utilisateur final. Les pipelines conviennent généralement aux approvisionnements industriels à grande échelle, tandis que les semi-remorques porte-tubes et les citernes d'hydrogène liquide offrent des solutions flexibles pour les stations de ravitaillement, les exploitations minières et les systèmes énergétiques décentralisés qui apparaissent en Afrique de l'Ouest. Les ingénieurs doivent également prendre en compte le coût total de possession, notamment le coût d'investissement, les dépenses d'exploitation, les pertes de BOG, la maintenance et les exigences de sécurité.

Le déploiement réussi de l'hydrogène exige le respect des normes internationales et de solides compétences pratiques en matière d'essais de pression, de détection des fuites, de gestion du gaz d'évaporation et de procédures de manipulation sûre. L'application des codes de sécurité et des meilleures pratiques d'exploitation dès la phase de conception contribue à garantir des infrastructures hydrogène fiables, efficaces et durables pour les applications industrielles, la mobilité et l'énergie.

Questions de révision en fin de chapitre

1. Un pipeline en acier au carbone présente des signes de fissuration après avoir été utilisé pour transporter de l'hydrogène. Quelle propriété est probablement à l'origine du phénomène, et quel matériau de remplacement recommanderiez-vous ?

2. Calculer le volume approximatif de stockage gazeux nécessaire pour 100 kg de H_2 à 350 bar (utiliser l'hypothèse du gaz parfait pour une estimation approximative ; préciser ses limites).
3. Pour un trajet de 200 km destiné à livrer 2 tonnes/jour à un dépôt d'autobus, recommander un mode de transport et justifier le choix par ses avantages et ses inconvénients.
4. Indiquer deux différences essentielles entre les difficultés d'exploitation du stockage en station sous forme de gaz comprimé et celles du stockage d'hydrogène liquide.
5. Citer une norme relative au protocole de ravitaillement en hydrogène gazeux et indiquer un paramètre essentiel qu'elle contrôle.

Compression et liquéfaction de l'hydrogène et infrastructures de pipelines

Acquis d'apprentissage du chapitre

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

- Expliquer les principes de fonctionnement des systèmes de compression et de liquéfaction de l'hydrogène.
- Comparer différentes technologies de compresseurs d'hydrogène et évaluer leurs applications industrielles.
- Décrire les infrastructures de pipelines d'hydrogène, la sélection des matériaux et les systèmes de gestion de la pression.
- Appliquer les principes de base de la distribution de l'hydrogène gazeux et de la régulation du débit.
- Identifier les principaux risques de sécurité associés aux systèmes de transport de l'hydrogène et recommander des mesures d'atténuation adaptées.
- Analyser les défis et les possibilités liés aux infrastructures de transport de l'hydrogène dans le contexte ouest-africain.

2.1. Systèmes de compression de l'hydrogène

La compression de l'hydrogène est un processus essentiel dans les systèmes de transport, de stockage et de distribution de l'hydrogène. En raison de sa très faible densité, l'hydrogène doit souvent être comprimé à haute pression avant son stockage ou son transport. Les systèmes de compression sont largement utilisés dans :

- les stations de ravitaillement en hydrogène
- les systèmes de transport par pipeline
- les installations industrielles de production d'hydrogène
- les stations de remplissage de semi-remorques porte-tubes
- les systèmes de stockage d'énergie renouvelable

Le choix d'un compresseur d'hydrogène dépend :

- de la pression de refoulement requise
- du débit d'hydrogène
- du rendement du système
- des exigences de sécurité
- du coût de maintenance
- de l'application de l'utilisateur final

En Afrique de l'Ouest, les systèmes de compression de l'hydrogène doivent également tenir compte :

- des températures ambiantes élevées
- des infrastructures de maintenance limitées

- de la fiabilité de l'alimentation électrique
- de la poussière et des environnements d'exploitation sévères
- des besoins d'expansion industrielle

Compresseurs mécaniques

Les compresseurs mécaniques utilisent des pièces mobiles telles que des pistons, des membranes, des vis ou des roues centrifuges pour comprimer l'hydrogène gazeux.

Types courants

- Compresseurs alternatifs (à pistons)
- Compresseurs à membrane
- Compresseurs à vis
- Compresseurs centrifuges

Les compresseurs mécaniques sont couramment utilisés parce qu'ils :

- permettent d'atteindre des pressions élevées
- acceptent des débits importants
- sont disponibles dans le commerce
- peuvent fonctionner dans des environnements industriels

Avantages

- Capacité de compression élevée
- Technologie industrielle éprouvée
- Adaptés aux stations de ravitaillement et aux pipelines

Limites

- Les pièces mobiles nécessitent une maintenance régulière
- Production de chaleur pendant la compression
- Risques de fuite au niveau des joints
- Usure mécanique et vibrations

Les compresseurs mécaniques peuvent être utilisés pour :

- les opérations minières
- les dépôts de ravitaillement en hydrogène
- les systèmes d'approvisionnement en gaz industriels
- les projets d'engrais et de raffinage

Compresseurs électrochimiques

Les compresseurs électrochimiques compriment l'hydrogène au moyen de réactions électrochimiques plutôt que par un mouvement mécanique. Les ions hydrogène traversent une membrane sous l'effet d'un potentiel électrique et se recombinent à une pression plus élevée.

Avantages

- Absence de pièces mécaniques mobiles
- Faible niveau sonore
- Risque de contamination réduit
- Grande pureté de l'hydrogène

Limites

- Débits plus faibles
- Coût d'investissement plus élevé
- Sensibilité de la membrane
- Échelle commerciale encore limitée

Applications typiques

- Systèmes de piles à combustible
- Applications de laboratoire
- Systèmes d'hydrogène de haute pureté
- Petites stations d'hydrogène

Systèmes de compression multi-étagée

L'hydrogène est couramment comprimé en plusieurs étages afin d'améliorer le rendement et de limiter une accumulation excessive de chaleur. Entre les étages, l'hydrogène traverse des refroidisseurs intermédiaires (intercoolers) afin d'abaisser la température du gaz avant l'étape de compression suivante.

Avantages des systèmes multi-étagés

- Amélioration du rendement énergétique
- Réduction des risques de détérioration du compresseur
- Température de fonctionnement plus basse
- Durée de vie accrue des équipements

Les systèmes multi-étagés sont largement utilisés dans :

- les systèmes de stockage à haute pression
- les stations de ravitaillement en hydrogène
- les systèmes d'injection dans les pipelines

Rendement et performances des compresseurs

Les performances d'un compresseur sont évaluées à l'aide des paramètres suivants :

- rapport de compression
- capacité de débit
- consommation d'énergie
- rendement thermique
- température de refoulement
- fiabilité

La compression de l'hydrogène consomme une quantité importante d'énergie et représente souvent un coût d'exploitation majeur dans les systèmes hydrogène.

Principaux défis d'exploitation

- Fuites d'hydrogène
- Dégradation des joints
- Surchauffe
- Maîtrise des vibrations
- Fluctuations de pression

Exercice

Une station de ravitaillement en hydrogène nécessite une livraison d'hydrogène à 700 bar pour des autobus à pile à combustible.

Tâche :

1. Recommandez un type de compresseur adapté.
2. Expliquez pourquoi une compression multi-étagée peut être nécessaire.
3. Identifiez deux difficultés de maintenance susceptibles de se présenter dans les climats chauds d'Afrique de l'Ouest.

Démonstration de l'instructeur / observation industrielle

Observer ou simuler :

- un système de compresseur alternatif
- un processus de compression multi-étagée
- un système de refroidissement intermédiaire
- un système de régulation de pression

Identifier :

- les étages de compression
- les systèmes de refroidissement

- les dispositifs de décharge de pression
- les mécanismes d'arrêt de sécurité

Normes pertinentes

- ASME B31.12 - Hydrogen piping and pipelines
- ISO 19880 - Hydrogen fueling stations
- API 618 - Reciprocating compressors
- NFPA 2 - Hydrogen technologies code

2.2. Systèmes de liquéfaction de l'hydrogène

La liquéfaction de l'hydrogène transforme l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant jusqu'à environ :

$$T \approx -253 \text{ °C}$$

La liquéfaction augmente fortement la densité de l'hydrogène, ce qui rend le stockage et le transport plus efficaces pour les applications à grande échelle. Les systèmes d'hydrogène liquide sont importants pour :

- les terminaux d'exportation
- l'industrie aérospatiale
- les systèmes de carburant maritime
- les grands réseaux d'approvisionnement industriel
- le transport d'hydrogène sur longue distance

Principes de la liquéfaction

L'hydrogène gazeux est comprimé, refroidi et détendu à plusieurs reprises au moyen de cycles frigorifiques jusqu'à sa liquéfaction. Les systèmes de liquéfaction consomment de grandes quantités d'énergie, car l'hydrogène présente :

- une faible masse moléculaire
- un point d'ébullition très bas
- une capacité thermique massique élevée

Systèmes de stockage cryogénique

L'hydrogène liquide est stocké dans :

- des réservoirs à double paroi
- des récipients isolés sous vide
- des bouteilles cryogéniques

Les systèmes de stockage comprennent :

- des soupapes de sûreté
- des couches d'isolation

- des systèmes de gestion du gaz d'évaporation (BOG)
- des systèmes d'évacuation d'urgence

Cycles frigorifiques

Les méthodes frigorifiques courantes comprennent :

- le cycle de Joule-Thomson
- le cycle de Claude
- le cycle frigorifique de Brayton

Ces systèmes éliminent progressivement la chaleur jusqu'à ce que l'hydrogène se liquéfie.

Gestion du gaz d'évaporation (BOG)

Les apports thermiques provoquent l'évaporation d'une partie de l'hydrogène liquide sous forme gazeuse, appelée gaz d'évaporation (BOG). Les pertes de BOG typiques sont comprises entre 0,2 % et 1 % par jour. Le BOG peut être :

- reliquéfié
- utilisé comme combustible
- évacué de manière contrôlée dans des conditions sûres

L'hydrogène liquide en Afrique de l'Ouest pourrait soutenir :

- les projets d'exportation d'hydrogène vert
- les zones industrielles côtières
- la décarbonation des ports
- les systèmes miniers et de transport lourd

Toutefois, les températures ambiantes élevées augmentent les besoins de réfrigération et les difficultés liées au gaz d'évaporation (BOG).

Exercice

Un terminal côtier d'exportation d'hydrogène nécessite un stockage d'hydrogène de longue durée.

Tâche :

1. Expliquez pourquoi le stockage sous forme d'hydrogène liquide peut être privilégié.
2. Identifiez deux difficultés techniques majeures.
3. Recommandez une méthode permettant de réduire les pertes de gaz d'évaporation.

Normes pertinentes

- ISO 21010 - Cryogenic vessels
- NFPA 2 - Hydrogen safety code
- ASME BPVC Section VIII - Pressure vessels

2.3. Infrastructures de pipelines d'hydrogène

Les pipelines d'hydrogène assurent le transport continu de grands volumes d'hydrogène entre les installations de production, les utilisateurs industriels, les sites de stockage et les terminaux d'exportation. Les pipelines d'hydrogène peuvent fonctionner entre $P = 20$ et 100 bar.

Les infrastructures de pipelines comprennent :

- les pipelines
- les compresseurs
- les vannes
- les capteurs
- les systèmes de surveillance
- les systèmes d'arrêt d'urgence

Matériaux et sélection des pipelines

Les pipelines d'hydrogène nécessitent des matériaux résistants :

- à la fragilisation par l'hydrogène
- à la corrosion
- à la fissuration par fatigue
- aux cycles de pression

Les matériaux couramment utilisés comprennent :

- les aciers inoxydables
- les aciers au carbone de nuance élevée
- les matériaux composites

Fragilisation par l'hydrogène

Les atomes d'hydrogène pénètrent dans certains métaux et affaiblissent progressivement leur structure. Cela peut provoquer :

- des fissures
- des fuites
- une défaillance mécanique
- une réduction de la durée de vie des équipements

Les mesures préventives comprennent :

- la sélection des matériaux
- les revêtements
- la maîtrise de la pression
- des inspections régulières

Sécurité et surveillance des pipelines

Les systèmes de pipelines d'hydrogène nécessitent :

- une surveillance continue de la pression
- des systèmes de détection des fuites
- des systèmes d'arrêt à distance
- une surveillance de la corrosion
- des capteurs de gaz

Les réseaux de pipelines en Afrique de l'Ouest pourraient desservir :

- les corridors industriels
- les projets énergétiques transfrontaliers
- les usines d'ammoniac vert
- les projets d'intégration aux raffineries

Les pays disposant d'infrastructures gazières existantes pourraient étudier les possibilités de mélange ou d'injection d'hydrogène dans leurs réseaux.

Exercice

Une usine d'engrais nécessite une livraison continue d'hydrogène depuis une installation d'énergie renouvelable située à 80 km.

Tâche :

1. Recommandez l'option la plus adaptée entre un pipeline et un transport par camion.
2. Identifiez deux aspects à prendre en compte pour la sélection des matériaux.
3. Expliquez une exigence majeure de sécurité.

Normes pertinentes

- ASME B31.12 - Hydrogen pipelines
- ISO 16111 - Hydrogen storage devices
- API 1160 - Pipeline integrity management

2.4. Distribution du gaz et régulation du débit

Les systèmes de distribution de l'hydrogène régulent la pression, contrôlent le débit et assurent une livraison sûre aux utilisateurs finaux. Les principaux composants comprennent :

- les régulateurs de pression
- les débitmètres
- les capteurs
- les vannes
- les systèmes de commande

- les détecteurs de fuites

Systèmes de régulation de pression

Les régulateurs de pression maintiennent une pression de gaz stable dans l'ensemble du système. Les systèmes hydrogène utilisent souvent :

- des régulateurs de pression primaires
- des régulateurs secondaires
- des soupapes de sûreté

Débitmètres et capteurs

Les systèmes de mesure du débit d'hydrogène surveillent :

- le débit
- la pression
- la température
- la pureté du gaz

Les technologies de capteurs courantes comprennent :

- les débitmètres massiques thermiques
- les débitmètres ultrasoniques
- les transducteurs de pression

Vannes et dispositifs de commande

Les systèmes hydrogène utilisent :

- des vannes d'isolement
- des clapets anti-retour
- des soupapes de sûreté
- des électrovannes
- des vannes d'arrêt d'urgence

Systèmes de détection des fuites

Les fuites d'hydrogène sont difficiles à détecter parce que l'hydrogène est :

- incolore
- inodore
- à forte diffusivité
- facilement inflammable

Les méthodes de détection des fuites comprennent :

- des détecteurs d'hydrogène gazeux

- des détecteurs de flamme
- la surveillance de la pression
- des capteurs acoustiques

Exercice

Une installation de stockage d'hydrogène subit des fluctuations de pression pendant les opérations de ravitaillement.

Tâche :

1. Recommandez des dispositifs de régulation de pression adaptés.
2. Identifiez des technologies appropriées de détection des fuites.
3. Expliquez pourquoi une détection rapide des fuites est essentielle.

Normes pertinentes

- ISO 26142 - Hydrogen detection apparatus
- NFPA 2 - Hydrogen technologies code
- IEC 61508 - Functional safety systems

2.5. Sécurité des systèmes de transport de l'hydrogène

Les systèmes hydrogène nécessitent une gestion rigoureuse de la sécurité, car l'hydrogène est :

- hautement inflammable
- s'enflamme facilement
- à forte diffusivité
- stocké à haute pression ou dans des conditions cryogéniques

Les dispositifs de sécurité doivent être intégrés à toutes les infrastructures hydrogène, depuis la conception jusqu'à l'exploitation.

Identification des dangers

Les principaux dangers comprennent :

- les fuites de gaz
- les incendies et explosions
- la surpression
- les brûlures cryogéniques
- la défaillance des équipements
- la fragilisation par l'hydrogène

Systèmes d'arrêt d'urgence

Les systèmes d'arrêt d'urgence isolent automatiquement le débit d'hydrogène en cas de :

- détection d'une fuite
- incendie
- défaillance liée à la pression
- dysfonctionnement du système

Exigences de ventilation

Les installations hydrogène nécessitent une ventilation efficace, car l'hydrogène s'élève rapidement et peut s'accumuler dans les espaces clos. Les systèmes de ventilation contribuent à :

- empêcher l'accumulation de gaz
- réduire le risque d'explosion
- améliorer la sécurité d'exploitation

Prévention des incendies et des explosions

Les mesures préventives comprennent :

- des équipements à sécurité intrinsèque
- des systèmes électriques protégés contre les explosions
- des systèmes de détection des gaz
- la mise à la terre et les liaisons équipotentielles
- des distances de séparation de sécurité

En Afrique de l'Ouest, la formation à la sécurité de l'hydrogène est essentielle à mesure que les industries de l'hydrogène se développent dans :

- les ports
- les opérations minières
- les systèmes d'énergie renouvelable
- les zones de transformation industrielle

Les établissements de formation technique et les industries doivent renforcer :

- la préparation aux situations d'urgence
- les capacités d'inspection de sécurité
- le développement des compétences techniques

2.6. Résumé du chapitre

La compression, la liquéfaction et les infrastructures de pipelines sont essentielles au stockage, au transport et à la distribution efficaces de l'hydrogène. Les systèmes de compression augmentent la densité de l'hydrogène pour le stockage et le ravitaillement, tandis que la liquéfaction permet le transport à grande échelle et les applications d'exportation. La sélection appropriée des compresseurs, des systèmes cryogéniques et des pipelines dépend des exigences de pression, de la distance de transport, du rendement opérationnel et des considérations de sécurité.

Les infrastructures hydrogène doivent être conçues avec soin afin de répondre à des difficultés telles que la fragilisation par l'hydrogène, les pertes de gaz d'évaporation, les risques de fuite, la régulation de la pression et la forte consommation d'énergie. Des systèmes hydrogène fiables nécessitent une surveillance efficace, la détection des fuites, une ventilation et des systèmes d'arrêt d'urgence, appuyés par des normes internationales de sécurité et par du personnel technique qualifié.

En Afrique de l'Ouest, les infrastructures de transport de l'hydrogène présentent un fort potentiel pour soutenir la croissance industrielle, l'exploitation minière, la mobilité propre, l'intégration des énergies renouvelables et les futurs marchés d'exportation d'hydrogène. Leur déploiement réussi dépendra de pratiques d'ingénierie sûres, de compétences opérationnelles, d'investissements dans les infrastructures et d'une formation technique solide des professionnels et techniciens de l'hydrogène.

Stations de ravitaillement en hydrogène et conception des infrastructures

Acquis d'apprentissage du chapitre

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

- Expliquer les composants et les processus d'exploitation des stations de ravitaillement en hydrogène.
- Évaluer les exigences de conception des stations de ravitaillement en hydrogène, notamment la planification de l'implantation, les systèmes de sécurité et la gestion de la pression.
- Appliquer les normes internationales, les protocoles de ravitaillement et les réglementations de sécurité utilisés dans les infrastructures de ravitaillement en hydrogène.
- Effectuer les opérations de base de maintenance, d'inspection, de dépannage et de sécurité d'exploitation des systèmes de ravitaillement en hydrogène.

3.1. Composants d'une station de ravitaillement en hydrogène

Les stations de ravitaillement en hydrogène (HRS) sont des installations spécialisées conçues pour stocker, comprimer, refroidir et distribuer en toute sécurité de l'hydrogène carburant aux véhicules à pile à combustible (FCV). Ces stations jouent un rôle essentiel dans le développement de systèmes de transport propres, notamment pour les autobus, les camions, les véhicules miniers, les équipements portuaires et les futurs systèmes de mobilité en Afrique de l'Ouest.

Une station type de ravitaillement en hydrogène comprend :

- des systèmes de stockage d'hydrogène
- des compresseurs
- des systèmes de refroidissement
- des distributeurs de carburant
- des systèmes de régulation de pression
- des capteurs et équipements de surveillance
- des systèmes de sécurité et d'arrêt d'urgence

La conception et la taille d'une station dépendent :

- de la demande quotidienne d'hydrogène
- du type de véhicule
- de la pression de ravitaillement
- du nombre de véhicules desservis
- de l'emplacement du site
- des exigences de sécurité

Systèmes de stockage d'hydrogène

Les stations de ravitaillement en hydrogène utilisent couramment :

- des systèmes de stockage de gaz comprimé
- des systèmes de stockage en cascade
- des réservoirs d'hydrogène liquide

L'hydrogène comprimé est généralement stocké à $P = 350$ bar ou 700 bar. Les systèmes de stockage sont conçus pour assurer la continuité de l'alimentation en carburant, stabiliser la pression pendant le ravitaillement et permettre un remplissage rapide des véhicules. Les systèmes en cascade utilisent plusieurs bancs de stockage fonctionnant à différents niveaux de pression afin d'améliorer l'efficacité du ravitaillement.

Compresseurs et distributeurs

Les compresseurs augmentent la pression de l'hydrogène avant son transfert vers les systèmes de stockage ou les distributeurs. Les distributeurs constituent l'interface finale entre la station et le véhicule. Ils contrôlent :

- la pression de ravitaillement
- le débit
- la température
- la quantité de carburant délivrée

Les distributeurs modernes comprennent :

- des systèmes de surveillance numériques
- des capteurs de pression
- des systèmes de compensation de température
- des verrouillages de sécurité

Systèmes de refroidissement

La température de l'hydrogène augmente pendant la compression rapide et le ravitaillement. Des systèmes de refroidissement sont donc nécessaires pour éviter une surchauffe lors du remplissage des véhicules. Les systèmes de prérefroidissement peuvent abaisser la température de l'hydrogène jusqu'à environ -40 °C. Le refroidissement améliore :

- la vitesse de ravitaillement
- la sécurité du réservoir
- la stabilité de la pression
- la protection du réservoir du véhicule

Systèmes de commande et de surveillance

Les stations hydrogène utilisent des systèmes de commande automatisés pour surveiller :

- la pression
- le débit

- la température
- les fuites d'hydrogène
- le fonctionnement du compresseur
- les systèmes d'arrêt d'urgence

Ces systèmes améliorent :

- la fiabilité opérationnelle
- la précision du ravitaillement
- les performances de sécurité

Les infrastructures de ravitaillement en hydrogène en Afrique de l'Ouest pourraient soutenir :

- les réseaux d'autobus à hydrogène
- les flottes minières
- la logistique portuaire
- les équipements d'assistance au sol dans les aéroports
- les systèmes de transport industriels

Les premiers déploiements devraient probablement se concentrer dans :

- les grandes villes
- les corridors miniers
- les ports
- les parcs industriels

Exercice

Une entreprise de transport prévoit d'exploiter des autobus à pile à combustible à hydrogène dans une grande ville d'Afrique de l'Ouest.

Tâche :

1. Identifiez les principaux composants nécessaires dans la station de ravitaillement.
2. Recommandez des niveaux de pression de stockage adaptés.
3. Expliquez pourquoi les systèmes de refroidissement sont importants lors des opérations de ravitaillement rapide.

Démonstration / observation industrielle

Observer ou simuler :

- le fonctionnement d'un distributeur d'hydrogène
- les systèmes de compression
- une configuration de stockage en cascade
- les systèmes de surveillance de la pression

Identifier :

- la séquence de ravitaillement
- les verrouillages de sécurité
- les commandes d'arrêt d'urgence
- les systèmes de régulation de pression

Normes pertinentes

- ISO 19880-1 — Hydrogen fueling stations
- SAE J2601 — Hydrogen fueling protocols
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

3.2. Exploitation d'une station de ravitaillement

Les stations de ravitaillement en hydrogène sont conçues pour transférer en toute sécurité l'hydrogène depuis les systèmes de stockage vers les réservoirs des véhicules, à des pressions et températures contrôlées. Les opérations de ravitaillement doivent être gérées avec soin afin d'assurer :

- un transfert sûr de l'hydrogène
- la stabilité de la pression
- une distribution précise du carburant
- la prévention de la surchauffe
- la compatibilité avec le véhicule

Les véhicules à hydrogène utilisent couramment des systèmes de ravitaillement à 350 bar ou 700 bar.

Processus de distribution de l'hydrogène

Le processus de ravitaillement suit généralement les étapes suivantes :

1. raccordement du véhicule au pistolet du distributeur
2. communication entre le véhicule et la station
3. vérification de la pression et de la température
4. transfert contrôlé de l'hydrogène
5. fin du ravitaillement et arrêt du système

La Figure 3.1 présente le diagramme de flux du processus de ravitaillement en hydrogène, montrant l'écoulement de l'hydrogène depuis le stockage jusqu'au réservoir du véhicule en passant par les compresseurs et les distributeurs. Le processus de distribution est automatisé afin de maintenir des conditions de ravitaillement sûres.

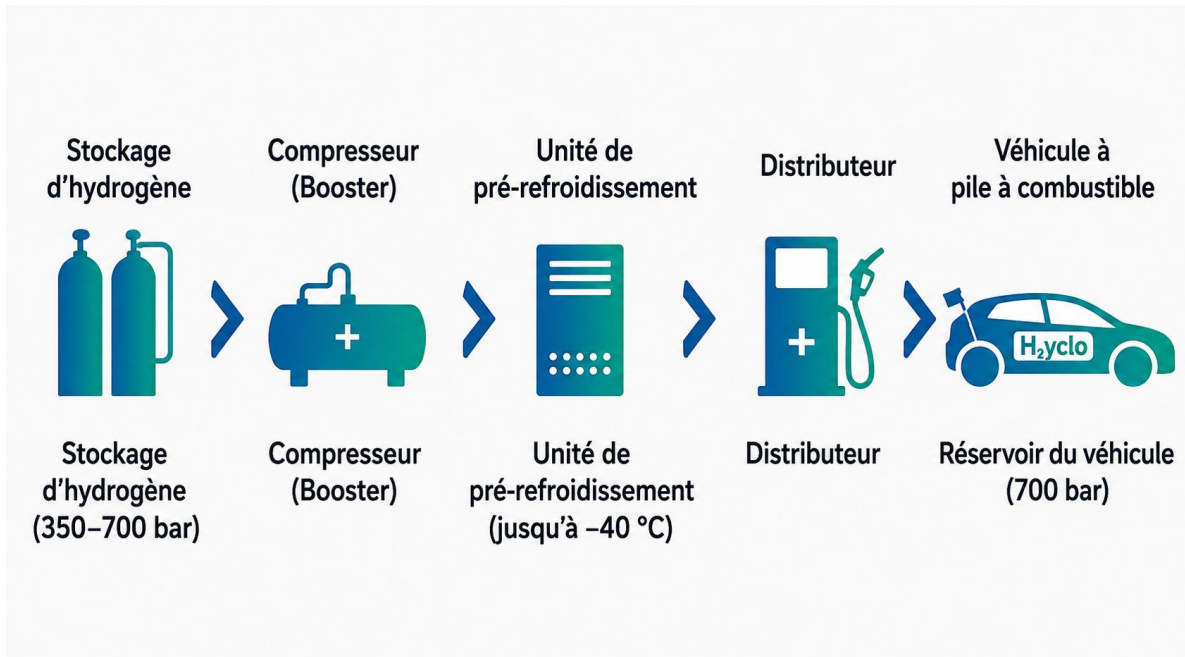


Figure 3.1 Diagramme de flux du processus de ravitaillement en hydrogène

Protocoles et normes de ravitaillement

Le ravitaillement en hydrogène suit des protocoles internationaux qui définissent la pression de remplissage, la température du carburant, le débit de ravitaillement, les procédures de sécurité et les systèmes de communication.

Les normes de ravitaillement contribuent à assurer la compatibilité entre :

- les différents modèles de véhicules
- les équipements de ravitaillement
- les systèmes de stockage

Gestion de la pression pendant le ravitaillement

La pression augmente rapidement pendant le ravitaillement en raison de la compression de l'hydrogène à l'intérieur du réservoir du véhicule. Les systèmes de régulation de pression contrôlent :

- le débit
- la pression du réservoir
- la température du carburant

Les systèmes de protection contre les surpressions empêchent :

- la détérioration du réservoir
- un échauffement excessif
- des conditions de ravitaillement dangereuses

Systèmes d'interface véhicule

Les systèmes d'interface véhicule comprennent les pistolets de ravitaillement, les connecteurs de communication, les capteurs de pression et les mécanismes de verrouillage. Ces systèmes assurent une connexion sûre entre :

- les réservoirs des véhicules
- les distributeurs de ravitaillement

Exercice

Une station hydrogène doit ravitailler quotidiennement 20 autobus au moyen de systèmes à 350 bar.

Tâche :

1. Expliquez la séquence du processus de ravitaillement.
2. Identifiez les principales exigences de régulation de pression.
3. Décrivez un risque associé au ravitaillement rapide.

Normes pertinentes

- SAE J2601 — Hydrogen fueling protocols
- ISO 17268 — Hydrogen fueling connectors
- ISO 19880-1 — Fueling station safety requirements

3.3. Considérations de conception des stations de ravitaillement

La conception d'une station de ravitaillement en hydrogène a une incidence directe sur :

- la sécurité
- l'efficacité opérationnelle
- l'accès des véhicules
- les activités de maintenance
- la capacité d'intervention d'urgence

La conception de la station doit prendre en compte :

- la pression de stockage de l'hydrogène
- la circulation des véhicules
- la ventilation
- la protection contre l'incendie
- les zones dangereuses
- les conditions environnementales

Choix du site

Les stations hydrogène devraient être implantées dans des zones présentant :

- un bon accès routier
- une alimentation électrique fiable
- une ventilation adéquate
- une séparation de sécurité suffisante par rapport aux zones peuplées
- un accès pour les services d'urgence

En Afrique de l'Ouest, les concepteurs doivent également prendre en compte :

- les températures ambiantes élevées
- l'exposition à la poussière
- les risques d'inondation
- la fiabilité du réseau électrique

Planification de l'implantation

L'implantation type d'une station comprend généralement :

- une zone de stockage d'hydrogène
- une section de compression
- une zone de distributeurs
- des voies de circulation des véhicules
- une salle de contrôle
- des points de rassemblement d'urgence

La Figure 3.2 illustre l'implantation d'une station de ravitaillement en hydrogène, avec le stockage, les compresseurs, les distributeurs, les systèmes de sécurité et les zones de ravitaillement. L'implantation doit réduire au minimum les encombrements, les risques d'inflammation et les difficultés de maintenance.

Exemple d'agencement d'une station de ravitaillement en hydrogène

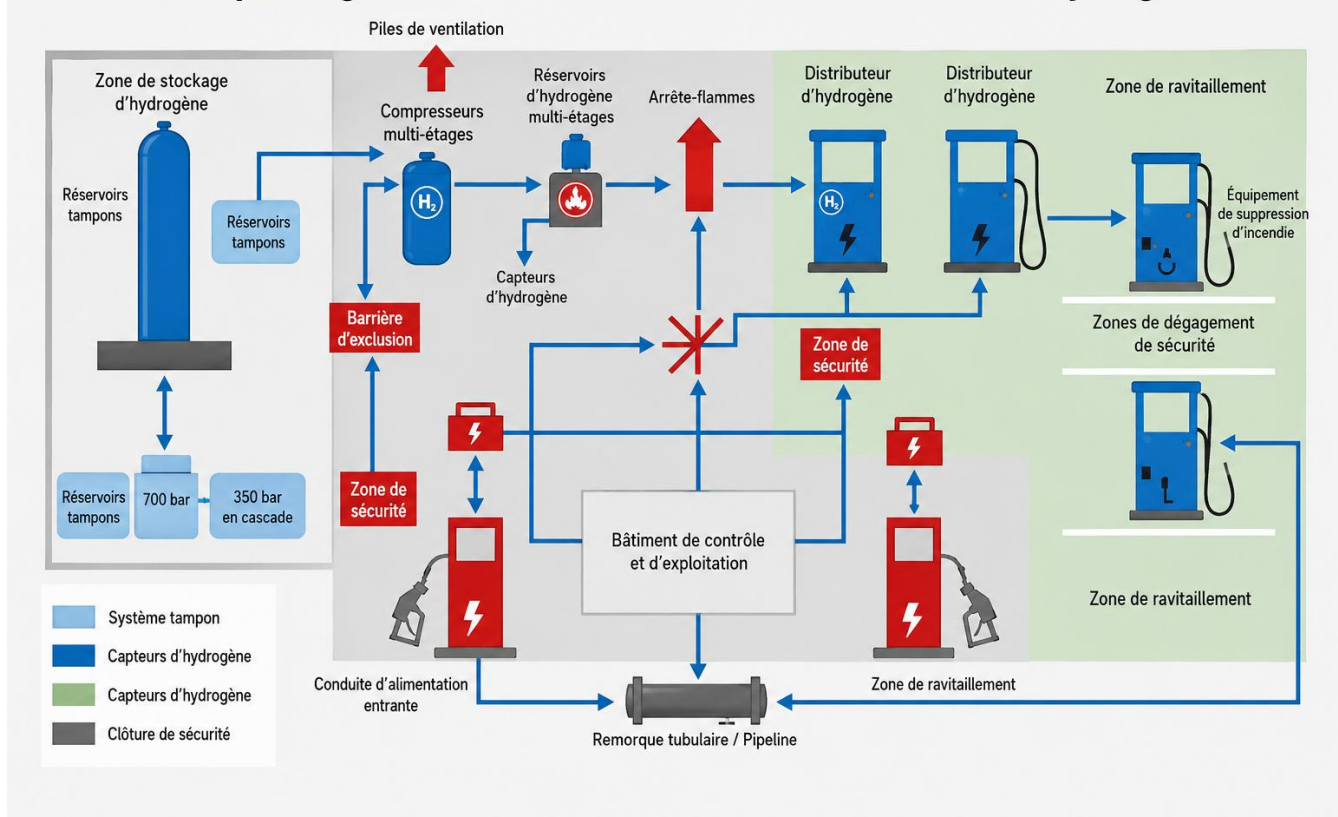


Figure 3.2 Implantation d'une station de ravitaillement en hydrogène

Distances de sécurité et zonage

Les stations hydrogène nécessitent des distances de séparation de sécurité entre les systèmes de stockage, les équipements électriques, les zones accessibles au public, les bâtiments et les voies de circulation des véhicules. Les zones dangereuses sont classées en fonction du risque d'explosion et du potentiel de concentration d'hydrogène.

Ventilation et systèmes d'urgence

Les systèmes de ventilation empêchent l'accumulation d'hydrogène dans les espaces clos. Les systèmes d'urgence comprennent :

- des systèmes d'extinction d'incendie
- des systèmes d'arrêt d'urgence
- des alarmes de détection de gaz
- des systèmes de décharge de pression
- des itinéraires d'évacuation

En Afrique de l'Ouest, les stations de ravitaillement en hydrogène pourraient, dans un premier temps, être intégrées à des dépôts d'autobus, des installations minières, des opérations portuaires et des plateformes de transport industriel.

La conception des stations doit donner la priorité :

- à des systèmes de sécurité robustes

- à la facilité de maintenance
- à la résilience aux conditions climatiques
- aux capacités techniques locales

Exercice

Une ville prévoit de construire une station de ravitaillement pour autobus à hydrogène près d'un terminal de transport.

Tâche :

1. Identifiez les facteurs pertinents pour le choix du site.
2. Expliquez pourquoi les systèmes de ventilation sont importants.
3. Recommandez deux considérations relatives au zonage de sécurité.

Normes pertinentes

- ISO 19880-1 — Hydrogen fueling stations
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code
- IEC 60079 — Explosive atmosphere classification

3.4. Normes et réglementations

Les stations de ravitaillement en hydrogène doivent être conformes aux normes internationales afin d'assurer la sécurité de l'exploitation, la compatibilité des équipements, la fiabilité des performances de ravitaillement, la protection de l'environnement et l'autorisation réglementaire. Les normes définissent des exigences concernant :

- les systèmes sous pression
- la qualité du carburant
- les récipients de stockage
- les distances de sécurité
- les protocoles de ravitaillement
- les systèmes de détection des fuites

Normes ISO relatives au ravitaillement en hydrogène

Les normes ISO importantes comprennent :

- ISO 19880 — Hydrogen fueling stations
- ISO 14687 — Hydrogen fuel quality
- ISO 17268 — Fueling connectors

Ces normes favorisent l'interopérabilité internationale, des procédures de ravitaillement sûres et la normalisation des équipements.

Codes internationaux de sécurité

Les systèmes de sécurité hydrogène s'appuient également sur :

- NFPA 2
- les normes IEC relatives aux atmosphères explosives
- les codes ASME relatifs aux récipients sous pression
- les protocoles SAE de ravitaillement

Réglementation des récipients sous pression

Les récipients de stockage d'hydrogène doivent respecter les réglementations relatives aux récipients sous pression concernant :

- la pression maximale admissible en service (MAWP)
- la résistance des matériaux
- la résistance à la fatigue
- les essais de pression
- les exigences d'inspection

Exercice

Un exploitant de station hydrogène prévoit d'installer de nouveaux récipients de stockage à haute pression.

Tâche :

1. Identifiez les normes pertinentes relatives aux récipients sous pression.
2. Expliquez pourquoi les normes internationales sont nécessaires.
3. Décrivez un risque de sécurité lié à la non-conformité.

Normes pertinentes

- ISO 19880 series
- ASME BPVC Section VIII
- NFPA 2
- SAE J2601

3.5. Maintenance et dépannage

Les stations de ravitaillement en hydrogène nécessitent des inspections régulières et une maintenance préventive afin d'assurer la sécurité de l'exploitation, la fiabilité des équipements, la précision du ravitaillement, la réduction des temps d'arrêt et une longue durée de vie des équipements. Les programmes de maintenance doivent comprendre :

- l'inspection des compresseurs
- les essais d'étanchéité
- l'étalonnage des capteurs
- l'inspection des vannes
- la maintenance du système de refroidissement

- la vérification des systèmes d'urgence

Procédures d'inspection

Les inspections de routine comprennent la vérification :

- des niveaux de pression
- des fuites d'hydrogène
- du fonctionnement des vannes
- des systèmes électriques
- des performances des capteurs
- de l'intégrité structurelle

Défaillances d'exploitation courantes

Les problèmes typiques d'une station comprennent :

- la surchauffe du compresseur
- la défaillance d'un capteur
- l'instabilité de la pression
- le dysfonctionnement du système de refroidissement
- les fuites d'hydrogène
- les erreurs de communication du distributeur

Maintenance préventive

La maintenance préventive contribue à réduire les défaillances d'équipements, les incidents de sécurité et les arrêts imprévus. Les programmes de maintenance doivent comprendre :

- la lubrification
- le remplacement des filtres
- l'inspection des joints
- les contrôles d'étalonnage
- les essais du système

Diagnostic des capteurs et des systèmes de commande

Les stations modernes utilisent des diagnostics automatisés pour détecter :

- une pression anormale
- les fuites de gaz
- les variations de température
- les défauts de communication
- les dysfonctionnements des équipements

Les techniciens doivent comprendre les systèmes d'alarme, les logiciels de diagnostic et les procédures d'intervention d'urgence.

Les programmes de maintenance hydrogène en Afrique de l'Ouest devraient mettre l'accent sur :

- le développement des compétences techniques
- la disponibilité des pièces de rechange
- la formation des techniciens locaux
- la maintenance d'équipements résistants aux conditions climatiques

Exercice

Une station hydrogène connaît des fluctuations répétées de pression et des interruptions de ravitaillement.

Tâche :

1. Identifiez les causes possibles.
2. Recommandez des procédures d'inspection.
3. Expliquez les mesures de maintenance préventive susceptibles de réduire la récurrence du problème.

Normes pertinentes

- ISO 19880 — Fueling station maintenance and safety
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code
- IEC 61508 — Functional safety systems

3.6. Résumé du chapitre

Les stations de ravitaillement en hydrogène constituent une infrastructure essentielle pour les véhicules à pile à combustible et les systèmes de transport propres. Elles intègrent des systèmes de stockage, des compresseurs, des unités de refroidissement, des distributeurs et des systèmes de commande automatisés afin de fournir en toute sécurité de l'hydrogène carburant dans des conditions contrôlées de pression et de température. Une exploitation correcte de la station repose sur une gestion efficace de la pression, des protocoles de ravitaillement, la prévention des fuites et la surveillance du système.

Une conception réussie d'une station hydrogène exige une attention particulière au choix du site, à la planification de l'implantation, à la ventilation, au zonage de sécurité et aux systèmes d'arrêt d'urgence. Les normes et réglementations internationales sont essentielles pour assurer la compatibilité des équipements, la fiabilité opérationnelle et une manipulation sûre de l'hydrogène. Le respect des normes de ravitaillement, des réglementations relatives aux récipients sous pression et des codes de sécurité contribue à réduire les risques d'exploitation et à améliorer les performances des infrastructures.

Des inspections régulières, une maintenance préventive et le dépannage sont indispensables au maintien d'une exploitation sûre et fiable des stations. Les techniciens doivent développer des compétences pratiques en maintenance des compresseurs, diagnostic des capteurs, détection des fuites, essais de pression et procédures d'intervention d'urgence. En Afrique de l'Ouest, les infrastructures de ravitaillement en hydrogène présentent un

fort potentiel pour soutenir les transports publics propres, les opérations minières, la mobilité industrielle et les futurs systèmes de transport bas carbone.

Analyse des performances et intégration des infrastructures

Acquis d'apprentissage du chapitre

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

- Évaluer les performances techniques et l'efficacité opérationnelle des infrastructures de stockage, de transport et de ravitaillement en hydrogène.
- Appliquer les technologies de surveillance et de commande utilisées dans les systèmes hydrogène, notamment les systèmes SCADA et les systèmes de surveillance à distance.
- Analyser l'intégration des infrastructures hydrogène avec les systèmes d'énergies renouvelables et les applications de stockage d'énergie.
- Évaluer les impacts économiques, environnementaux et de durabilité des projets d'infrastructures hydrogène dans les applications industrielles et de mobilité.

4.1. Évaluation des performances des infrastructures

L'évaluation des performances est essentielle pour garantir que les infrastructures hydrogène fonctionnent de manière sûre, efficace et économique. Les ingénieurs et les techniciens doivent surveiller en continu le rendement du système, la consommation d'énergie, les performances du stockage et les pertes d'hydrogène afin d'améliorer la fiabilité et de réduire les coûts d'exploitation.

L'analyse des performances des infrastructures hydrogène porte généralement sur :

- l'efficacité du stockage
- le rendement de compression
- la consommation d'énergie
- les pertes de transport
- la maîtrise des fuites
- la fiabilité du système

En Afrique de l'Ouest, l'optimisation des performances est particulièrement importante parce que :

- les coûts de l'énergie peuvent être élevés
- les investissements dans les infrastructures sont limités
- les distances de transport peuvent être importantes
- les conditions environnementales peuvent affecter l'efficacité des équipements

Analyse de l'efficacité du stockage

L'efficacité du stockage de l'hydrogène mesure dans quelle mesure l'hydrogène est stocké puis récupéré avec des pertes d'énergie minimales. Les performances dépendent de la pression de stockage, de la stabilité de la température, du taux de fuite, des pertes par évaporation (boil-off gas, BOG) et des performances des matériaux.

Les systèmes à gaz comprimé peuvent subir des pertes de pression, tandis que les systèmes à hydrogène liquide doivent gérer l'évaporation générant du gaz d'évaporation (BOG).

Rendement de compression

La compression de l'hydrogène consomme une quantité importante d'énergie électrique et influe directement sur les coûts d'exploitation. Le rendement de compression est influencé par :

- le type de compresseur
- le nombre d'étages de compression
- les performances du refroidissement
- le rapport de compression
- les pertes mécaniques

Les compresseurs multi-étagés équipés de systèmes de refroidissement intermédiaire améliorent le rendement et réduisent la surchauffe.

Analyse de la consommation d'énergie

Les systèmes hydrogène nécessitent de l'énergie pour la compression, la liquéfaction, le refroidissement, le pompage, la surveillance et les systèmes de sécurité. Les ingénieurs doivent évaluer la consommation énergétique totale du système afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle et de réduire les coûts.

Analyse des pertes de transport et des fuites

Des pertes d'hydrogène peuvent se produire lors :

- du transport par pipeline
- du stockage
- du ravitaillement des véhicules
- de la compression
- du transport d'hydrogène liquide

Les molécules d'hydrogène étant très petites et fortement diffusives, la maîtrise des fuites est essentielle pour :

- la sécurité
- la réduction des coûts
- la protection de l'environnement

L'évaluation des performances des infrastructures en Afrique de l'Ouest est importante pour :

- les projets d'hydrogène renouvelable
- les opérations minières
- les réseaux d'autobus à hydrogène
- les réseaux d'approvisionnement industriel en hydrogène

Une amélioration de l'efficacité peut réduire les coûts d'exploitation et accroître la fiabilité des infrastructures dans les marchés émergents de l'hydrogène.

Exercice

Une entreprise de transport d'hydrogène connaît des coûts d'exploitation élevés et de fréquentes pertes de pression lors des opérations de livraison.

Tâche :

1. Identifiez les sources possibles de pertes d'énergie.
2. Recommandez des méthodes permettant d'améliorer le rendement de compression.
3. Expliquez pourquoi la surveillance des fuites est importante.

Démonstration / observation industrielle

Observer ou simuler :

- la surveillance des performances d'un compresseur
- l'analyse des pertes de pression
- la surveillance du débit d'hydrogène
- les calculs d'efficacité du stockage

Identifier :

- les indicateurs de rendement du système
- les postes de consommation énergétique
- les emplacements potentiels de fuite
- les possibilités d'optimisation de l'exploitation

Normes pertinentes

- ISO 19880 — Hydrogen fueling systems
- ASME B31.12 — Hydrogen pipelines
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

4.2. Systèmes de surveillance des infrastructures hydrogène

Les infrastructures hydrogène nécessitent une surveillance continue afin d'assurer une exploitation sûre, des performances fiables, la prévention des fuites, la stabilité de la pression et la protection des équipements. Les systèmes de surveillance collectent et transmettent les données d'exploitation provenant des compresseurs, des pipelines, des systèmes de stockage, des stations de ravitaillement et des installations d'hydrogène renouvelable.

a) Systèmes SCADA

Les systèmes SCADA (supervision, contrôle et acquisition de données) sont largement utilisés dans les infrastructures hydrogène pour surveiller et commander les opérations à distance. Les systèmes SCADA assurent :

- la surveillance en temps réel
- la gestion des alarmes

- l'enregistrement des données
- la commande des équipements
- la détection des défauts

Les systèmes SCADA améliorent la fiabilité opérationnelle, la réponse aux situations d'urgence, l'efficacité du système et la planification de la maintenance.

b) Surveillance de la pression et de la température

Les systèmes hydrogène nécessitent une surveillance continue des niveaux de pression, de la température du gaz, du débit et des conditions de stockage. Les capteurs de pression et de température contribuent à prévenir :

- les situations de surpression
- les dommages aux équipements
- les opérations de ravitaillement dangereuses

c) Surveillance de la qualité du gaz

La qualité de l'hydrogène carburant est importante pour les performances des piles à combustible, la protection des équipements et la sécurité d'exploitation. Les systèmes de surveillance du gaz détectent :

- l'humidité
- la contamination par l'oxygène
- les impuretés
- les particules

d) Technologies de surveillance à distance

Les systèmes hydrogène modernes utilisent :

- les communications sans fil
- la surveillance hébergée dans le cloud
- des capteurs IoT (Internet des objets)
- des diagnostics automatisés

La surveillance à distance permet aux opérateurs de superviser des infrastructures réparties sur de vastes zones géographiques.

Les systèmes de surveillance à distance sont particulièrement utiles en Afrique de l'Ouest pour :

- les sites miniers isolés
- les projets d'énergies renouvelables
- les réseaux de pipelines longue distance
- les infrastructures hydrogène décentralisées

Les technologies de surveillance numérique peuvent améliorer la fiabilité opérationnelle lorsque les effectifs techniques disponibles sont limités.

Exercice

Un réseau de pipelines d'hydrogène nécessite une surveillance centralisée de son exploitation.

Tâche :

1. Expliquez comment les systèmes SCADA améliorent la sécurité des infrastructures.
2. Identifiez les principaux capteurs de surveillance.
3. Décrivez un avantage des systèmes de surveillance à distance.

Normes pertinentes

- IEC 61508 — Functional safety systems
- ISO 26142 — Hydrogen detection apparatus
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

4.3. Intégration avec les systèmes d'énergies renouvelables

L'hydrogène vert est produit à partir d'électricité renouvelable issue de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, de l'hydroélectricité et de systèmes énergétiques à biomasse. Les infrastructures hydrogène facilitent l'intégration des énergies renouvelables en stockant les excédents d'électricité renouvelable et en distribuant l'énergie aux secteurs du transport, de l'industrie et de la production d'électricité.

4.3.1. Distribution de l'hydrogène renouvelable

L'hydrogène renouvelable peut être distribué par :

- pipelines
- semi-remorques porte-tubes
- systèmes à hydrogène liquide
- stations de ravitaillement

L'hydrogène permet de transporter et d'utiliser ailleurs l'énergie renouvelable produite sur un site donné.

4.3.2. Systèmes hydrogène raccordés au réseau

Les systèmes hydrogène peuvent être raccordés aux réseaux électriques afin de :

- stabiliser l'approvisionnement en énergie renouvelable
- stocker les excédents d'électricité
- soutenir les systèmes d'alimentation de secours
- améliorer la fiabilité du réseau

Les électrolyseurs peuvent fonctionner pendant les périodes de forte production d'électricité renouvelable.

4.3.3. Applications de stockage d'énergie

L'hydrogène constitue une technologie importante de stockage d'énergie de longue durée. Les systèmes de stockage d'énergie sous forme d'hydrogène peuvent soutenir :

- les mini-réseaux
- les systèmes électriques industriels
- les systèmes de secours à énergie renouvelable
- le stockage saisonnier de l'énergie

Le stockage de l'hydrogène contribue à équilibrer les fluctuations de la production solaire et éolienne.

L'Afrique de l'Ouest présente un fort potentiel pour l'hydrogène renouvelable grâce à :

- un fort ensoleillement
- des ressources éoliennes
- l'expansion des projets d'énergies renouvelables
- une demande énergétique industrielle croissante

Les systèmes hydrogène peuvent soutenir :

- l'électrification rurale
- les opérations minières
- les systèmes de transport propres
- les projets d'exportation d'énergie renouvelable

Exercice

Un site industriel alimenté par l'énergie solaire souhaite stocker les excédents d'électricité renouvelable au moyen de systèmes hydrogène.

Tâche :

1. Expliquez comment le stockage de l'hydrogène favorise l'intégration des énergies renouvelables.
2. Identifiez des solutions de stockage d'hydrogène appropriées.
3. Décrivez un avantage opérationnel des systèmes hydrogène raccordés au réseau.

Normes pertinentes

- ISO 14687 — Hydrogen fuel quality
- Normes IEC relatives à l'intégration des énergies renouvelables
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

4.4. Analyse économique des infrastructures hydrogène

L'analyse économique est essentielle pour déterminer la faisabilité et la viabilité à long terme des projets hydrogène. Les coûts des infrastructures hydrogène comprennent généralement les systèmes de production, les systèmes de compression, les équipements de stockage, les pipelines, les stations de ravitaillement, les systèmes de surveillance et les opérations de maintenance.

4.4.1. Coûts d'investissement et d'exploitation

Les coûts d'investissement comprennent :

- l'achat des équipements
- l'installation
- l'aménagement du site
- la construction
- la conception technique

Les coûts d'exploitation comprennent :

- la consommation d'électricité
- la maintenance
- le personnel
- le refroidissement
- l'énergie de compression
- les pertes d'hydrogène

4.4.2. Analyse des coûts de transport

Le coût du transport de l'hydrogène dépend :

- de la distance
- du mode de transport
- de la pression de ravitaillement
- de l'échelle de l'infrastructure
- du coût d'exploitation des véhicules

Les pipelines sont généralement rentables pour le transport continu à grande échelle, tandis que les remorques et les citernes offrent davantage de flexibilité aux marchés de plus petite taille.

4.4.3. Économie des stations de ravitaillement

L'économie d'une station hydrogène dépend de la demande quotidienne d'hydrogène, du taux d'utilisation des véhicules, du rendement des équipements, du coût de l'électricité et des exigences de maintenance. Un faible taux d'utilisation de la station peut accroître le coût du carburant par kilogramme d'hydrogène.

4.4.3. Stratégies d'optimisation des coûts

Les stratégies de réduction des coûts comprennent :

- l'intégration des énergies renouvelables
- l'amélioration du rendement des compresseurs
- la réduction des fuites d'hydrogène
- la maintenance préventive
- les systèmes d'infrastructures partagées

L'économie des infrastructures hydrogène en Afrique de l'Ouest peut être influencée par :

- la disponibilité des infrastructures
- les prix de l'électricité
- la dépendance aux importations
- la logistique du transport
- les capacités locales de fabrication

La coopération régionale et l'expansion des énergies renouvelables pourraient réduire les coûts futurs de l'hydrogène.

Exercice

Une entreprise prévoit de construire une station de ravitaillement en hydrogène destinée à des autobus de transport public.

Tâche :

1. Identifiez les principaux postes de coûts d'investissement.
2. Expliquez deux facteurs influant sur les coûts d'exploitation.
3. Recommandez une stratégie d'optimisation des coûts.

Normes pertinentes

- Normes ISO relatives aux infrastructures hydrogène
- Méthodes internationales d'évaluation des coûts énergétiques
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

4.5. Considérations environnementales et de durabilité

Les infrastructures hydrogène peuvent contribuer à réduire sensiblement les émissions de gaz à effet de serre lorsque l'hydrogène est produit à partir de sources d'énergie renouvelable. L'analyse environnementale des systèmes hydrogène porte sur :

- les émissions de carbone
- l'efficacité énergétique
- l'utilisation de l'eau
- les fuites d'hydrogène
- la sécurité environnementale
- le développement durable des infrastructures

Réduction des émissions de carbone

L'hydrogène vert peut remplacer les combustibles fossiles dans les systèmes de transport, les procédés industriels, la production d'électricité et les opérations minières. Cela peut réduire de manière significative les émissions de dioxyde de carbone, la pollution atmosphérique et la dépendance aux combustibles fossiles.

Logistique durable de l'hydrogène

Les systèmes hydrogène durables visent à :

- minimiser les pertes de transport
- réduire le gaspillage énergétique
- améliorer l'efficacité des infrastructures
- utiliser de l'électricité renouvelable
- réduire l'impact environnemental

Une planification logistique efficace améliore à la fois les performances économiques et environnementales.

Évaluation des risques environnementaux

Les projets hydrogène doivent évaluer les risques de fuite, les risques d'incendie, l'utilisation des ressources en eau, l'incidence de l'occupation des sols et la protection des écosystèmes. Les évaluations environnementales contribuent à garantir un développement sûr et durable des projets.

Les systèmes hydrogène en Afrique de l'Ouest peuvent soutenir :

- une croissance industrielle bas carbone
- des transports publics propres
- le développement des énergies renouvelables
- des stratégies de résilience climatique

Les infrastructures hydrogène peuvent contribuer aux objectifs de développement durable tout en soutenant l'industrialisation régionale.

Exercice

Une entreprise minière prévoit de remplacer ses camions diesel par des véhicules à pile à combustible à hydrogène.

Tâche :

1. Identifiez les avantages environnementaux possibles.
2. Expliquez un enjeu de durabilité.
3. Recommandez une mesure permettant d'améliorer la performance environnementale.

Normes pertinentes

- ISO 14001 — Environmental management systems
- ISO 19870 — Hydrogen supply chain emissions
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

4.6. Résumé du chapitre

L'analyse des performances et l'intégration des infrastructures sont essentielles pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes hydrogène. Les ingénieurs et les techniciens doivent évaluer les

performances du stockage, le rendement de compression, la consommation d'énergie, les pertes de transport et la fiabilité du système afin d'optimiser les opérations hydrogène et de réduire les coûts d'exploitation.

Les infrastructures hydrogène modernes s'appuient fortement sur des systèmes de surveillance et d'automatisation tels que les systèmes SCADA, les capteurs, les systèmes de détection des fuites et les diagnostics à distance. Ces technologies améliorent la sécurité d'exploitation, la planification de la maintenance et la réponse aux situations d'urgence, tout en favorisant des opérations fiables de transport, de stockage et de ravitaillement en hydrogène.

Les infrastructures hydrogène jouent également un rôle important dans l'intégration des énergies renouvelables en permettant le stockage d'énergie de longue durée, la stabilisation du réseau et la distribution d'énergie propre. L'analyse économique, la durabilité environnementale et l'optimisation des coûts sont essentielles au développement de projets hydrogène réalisables, notamment sur les marchés émergents de l'hydrogène en Afrique de l'Ouest, axés sur la croissance industrielle, la mobilité propre, l'expansion des énergies renouvelables et le développement bas carbone.

Applications industrielles, tendances émergentes et gestion de la sécurité

Acquis d'apprentissage du chapitre

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

- Expliquer les principales applications industrielles et de mobilité des systèmes d'infrastructures hydrogène.
- Appliquer les principes de gestion de la sécurité liés à l'hydrogène, notamment l'évaluation des risques, l'analyse HAZOP et les procédures d'intervention d'urgence.
- Évaluer les technologies hydrogène émergentes et les futurs systèmes de mobilité à hydrogène.
- Analyser les tendances de l'économie de l'hydrogène, les cadres politiques et réglementaires ainsi que les possibilités d'investissement pertinentes pour le développement de l'hydrogène à l'échelle mondiale et en Afrique de l'Ouest.

5.1. Applications industrielles des infrastructures hydrogène

Les infrastructures hydrogène prennent en charge un large éventail d'applications industrielles, énergétiques et de mobilité. À mesure que les pays évoluent vers des systèmes énergétiques bas carbone, l'hydrogène est de plus en plus utilisé pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles, améliorer la sécurité énergétique et soutenir un développement industriel propre. Les applications des infrastructures hydrogène comprennent :

- les systèmes de transport à pile à combustible
- l'approvisionnement industriel en gaz
- le stockage des énergies renouvelables
- les systèmes d'exportation d'hydrogène
- la production d'électricité
- la production chimique et d'engrais

En Afrique de l'Ouest, les infrastructures hydrogène présentent un fort potentiel pour soutenir :

- les opérations minières
- les transports publics
- la logistique portuaire
- l'intégration des énergies renouvelables
- la décarbonation industrielle
- les filières d'exportation vertes

5.1.1. Ravitaillement des véhicules à pile à combustible

Les infrastructures de ravitaillement en hydrogène prennent en charge :

- les autobus à pile à combustible
- les camions

- les véhicules particuliers
- les véhicules miniers
- les équipements portuaires

Les véhicules à pile à combustible convertissent l'hydrogène en électricité au moyen de piles à combustible et ne rejettent à l'échappement que de la vapeur d'eau. Les systèmes de mobilité à hydrogène offrent :

- un ravitaillement rapide
- une grande autonomie
- une réduction des émissions de carbone
- une diminution de la pollution atmosphérique

5.1.2. Systèmes d'approvisionnement industriel en hydrogène

L'hydrogène est largement utilisé dans :

- le raffinage du pétrole
- la production d'engrais
- la fabrication de produits chimiques
- la production d'acier
- les industries de transformation alimentaire

Les infrastructures industrielles d'hydrogène comprennent :

- des pipelines
- des systèmes de stockage
- des compresseurs
- des systèmes de distribution
- des systèmes de surveillance de la sécurité

5.1.3. Systèmes d'exportation et d'importation d'hydrogène

L'hydrogène peut être exporté ou importé sous plusieurs formes :

- hydrogène comprimé
- hydrogène liquide
- ammoniac
- vecteurs organiques liquides d'hydrogène (LOHC)

Les pays disposant d'importantes ressources en énergies renouvelables peuvent devenir de futurs exportateurs d'hydrogène.

Des pays d'Afrique de l'Ouest tels que la Mauritanie, le Sénégal, le Nigeria, le Ghana et la Namibie étudient de plus en plus les possibilités d'exportation d'hydrogène vert.

5.1.4. Applications Power-to-Gas

Les systèmes Power-to-Gas convertissent les excédents d'électricité renouvelable en hydrogène par électrolyse. L'hydrogène peut ensuite être stocké, injecté dans des réseaux de gaz, utilisé pour produire de l'électricité, fourni aux industries et utilisé dans les systèmes de transport. Les systèmes Power-to-Gas contribuent à améliorer l'intégration des énergies renouvelables et la stabilité du réseau.

Exercice

Une entreprise minière prévoit de remplacer ses camions diesel par des véhicules à pile à combustible à hydrogène.

Tâche :

1. Identifiez les infrastructures hydrogène nécessaires.
2. Expliquez deux avantages des systèmes utilisant l'hydrogène comme carburant.
3. Décrivez une difficulté opérationnelle.

Normes pertinentes

- ISO 14687 — Hydrogen fuel quality
- ISO 19880 — Hydrogen fueling stations
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

5.2. Gestion de la sécurité des infrastructures hydrogène

Les infrastructures hydrogène nécessitent une gestion rigoureuse de la sécurité, car l'hydrogène est :

- hautement inflammable
- facilement inflammable
- stocké sous haute pression
- fortement diffusif
- parfois manipulé à des températures cryogéniques

Les systèmes de gestion de la sécurité contribuent à réduire les risques d'incendie et d'explosion, les défaillances des équipements, les blessures humaines, les dommages environnementaux et les arrêts d'exploitation.

5.2.1. Méthodes d'évaluation des risques

L'évaluation des risques permet d'identifier :

- les dangers potentiels
- les points de défaillance
- les risques opérationnels
- les scénarios d'urgence

L'analyse des risques prend en compte :

- la probabilité de défaillance

- la gravité des conséquences
- le niveau d'exposition
- les mesures de maîtrise de la sécurité

5.2.2. Analyse des dangers et de l'opérabilité (HAZOP)

La méthode HAZOP est une méthode structurée d'évaluation de la sécurité utilisée pour identifier les dangers opérationnels et les écarts de procédé.

Les études HAZOP évaluent :

- les écarts de pression
- les interruptions de débit
- les dysfonctionnements des équipements
- les variations de température
- les risques d'erreur humaine

La méthode HAZOP améliore :

- la sécurité des procédés
- la fiabilité des équipements
- la préparation aux situations d'urgence

5.2.3. Planification des interventions d'urgence

Les installations hydrogène doivent disposer de procédures d'intervention d'urgence pour les fuites de gaz, les incendies, les explosions, les défaillances d'équipement et les coupures de courant. Les systèmes d'urgence peuvent comprendre :

- des systèmes d'arrêt d'urgence
- des alarmes de détection de gaz
- des systèmes d'extinction d'incendie
- des plans d'évacuation
- des systèmes de communication d'urgence

5.2.4. Procédures de sécurité au travail

Les procédures de sécurité liées à l'hydrogène comprennent :

- les équipements de protection individuelle (EPI)
- les permis de travail en sécurité
- les contrôles de présence de gaz
- les procédures de consignation des énergies (Lockout/Tagout, LOTO)
- la sécurité des espaces confinés
- les mesures de prévention des incendies

La formation et la sensibilisation à la sécurité sont essentielles pour l'ensemble du personnel travaillant avec l'hydrogène.

À mesure que les industries de l'hydrogène se développent en Afrique de l'Ouest, les entreprises et les établissements techniques doivent renforcer :

- les programmes de formation à la sécurité
- les capacités d'intervention d'urgence
- les systèmes d'inspection technique
- la réglementation relative à la sécurité de l'hydrogène

Exercice

Une installation de stockage d'hydrogène présente une suspicion de fuite d'hydrogène à proximité d'un système de compression.

Tâche :

1. Identifiez les actions de sécurité immédiates.
2. Expliquez comment une analyse HAZOP pourrait réduire les risques futurs.
3. Recommandez des procédures d'intervention d'urgence appropriées.

Normes pertinentes

- NFPA 2 — Hydrogen technologies code
- ISO 45001 — Occupational health and safety management systems
- IEC 61511 — Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector

5.3. Technologies émergentes pour les infrastructures hydrogène

Les technologies de l'hydrogène évoluent rapidement afin d'améliorer l'efficacité, la sécurité, l'automatisation, le stockage de l'énergie, la fiabilité des infrastructures et le transport de l'hydrogène sur longue distance. Les technologies émergentes devraient jouer un rôle majeur dans les futures économies de l'hydrogène et les systèmes énergétiques intelligents.

5.3.1. Réseaux hydrogène intelligents

Les réseaux hydrogène intelligents intègrent :

- les systèmes d'énergies renouvelables
- la production d'hydrogène
- les systèmes de stockage
- les pipelines
- les utilisateurs industriels
- les systèmes de surveillance numérique

Ces systèmes utilisent :

- l'automatisation
- la surveillance en temps réel
- l'optimisation fondée sur l'intelligence artificielle (IA)
- des capteurs intelligents

Les réseaux hydrogène intelligents améliorent l'équilibrage énergétique, l'efficacité des infrastructures et la fiabilité du système.

5.3.2. Pipelines souterrains d'hydrogène

Les futurs systèmes hydrogène pourront utiliser des réseaux dédiés de pipelines souterrains d'hydrogène pour :

- le transport d'hydrogène sur longue distance
- l'approvisionnement industriel
- la distribution transfrontalière d'énergie

Les systèmes souterrains nécessitent :

- des matériaux spécialisés
- une protection contre la corrosion
- une surveillance continue
- des technologies de détection des fuites

5.3.3. Vecteurs organiques liquides d'hydrogène (LOHC)

Les systèmes LOHC stockent chimiquement l'hydrogène dans des liquides vecteurs.

Leurs avantages comprennent :

- un transport facilité
- une sécurité améliorée
- des besoins réduits en stockage à haute pression
- une compatibilité avec les infrastructures existantes de carburants

L'hydrogène est libéré du vecteur par des procédés de déshydrogénation.

5.3.4. Surveillance par IA et maintenance prédictive

Les systèmes d'intelligence artificielle (IA) peuvent améliorer les infrastructures hydrogène en :

- prédisant les défaillances des équipements
- détectant les conditions anormales
- optimisant les calendriers de maintenance
- améliorant l'efficacité opérationnelle

Les systèmes d'IA prennent en charge :

- la maintenance prédictive
- la détection des fuites

- la surveillance des compresseurs
- la gestion à distance des infrastructures

Les technologies hydrogène émergentes en Afrique de l'Ouest peuvent soutenir :

- les parcs industriels intelligents
- l'intégration des énergies renouvelables
- le commerce transfrontalier de l'hydrogène
- la surveillance des infrastructures à distance
- les opérations minières durables

Les technologies numériques peuvent améliorer la gestion des infrastructures lorsque les compétences techniques et les ressources de maintenance sont limitées.

Exercice

Un exploitant de pipeline d'hydrogène prévoit d'introduire des systèmes de surveillance fondés sur l'IA.

Tâche :

1. Expliquez comment la maintenance prédictive améliore la fiabilité.
2. Identifiez des technologies de surveillance appropriées.
3. Décrivez un avantage opérationnel des réseaux hydrogène intelligents.

Normes pertinentes

- Normes IEC relatives aux réseaux intelligents
- Normes ISO relatives aux infrastructures hydrogène
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

5.4. Tendances futures de la mobilité à hydrogène

La mobilité à hydrogène se développe rapidement à mesure que les pouvoirs publics et les industries recherchent des solutions de transport bas carbone. Les systèmes de transport fonctionnant à l'hydrogène comprennent les autobus, les camions, les trains, les navires, les aéronefs et les véhicules industriels. La mobilité à hydrogène offre :

- une réduction des émissions de gaz à effet de serre
- un ravitaillement rapide
- une grande autonomie
- une réduction de la dépendance aux combustibles fossiles

5.4.1. Transports fonctionnant à l'hydrogène

Les véhicules à pile à combustible à hydrogène produisent de l'électricité au moyen de piles à combustible.

Le transport à hydrogène est particulièrement adapté :

- au transport lourd

- à la logistique longue distance
- aux systèmes de transports publics
- aux véhicules miniers et industriels

5.4.2. Applications de l'hydrogène dans l'aviation et le transport maritime

L'hydrogène est étudié comme futur carburant pour :

- la propulsion aéronautique
- les systèmes de transport maritime
- les opérations portuaires
- les carburants durables d'aviation

Les systèmes aéronautiques à hydrogène peuvent utiliser :

- de l'hydrogène liquide comme carburant
- des piles à combustible
- des turbines à combustion d'hydrogène

Les applications maritimes de l'hydrogène peuvent faire intervenir :

- l'hydrogène liquide
- l'ammoniac vert
- des navires propulsés par piles à combustible

5.4.3. Développement de corridors hydrogène

Les corridors hydrogène sont des axes de transport équipés d'infrastructures de ravitaillement en hydrogène.

Ces corridors favorisent :

- la mobilité à hydrogène sur longue distance
- le transport de marchandises
- les systèmes de transport régionaux
- les axes commerciaux internationaux

Les futurs systèmes de mobilité à hydrogène en Afrique de l'Ouest peuvent soutenir :

- les corridors de transport régionaux
- la logistique portuaire
- les systèmes de transport minier
- les réseaux d'autobus urbains
- les opérations maritimes durables

Les corridors hydrogène pourraient à terme relier les principaux pôles industriels et de transport d'Afrique de l'Ouest.

Exercice

Une autorité régionale de transport prévoit de développer un corridor d'autobus à hydrogène entre deux grandes villes.

Tâche :

1. Identifiez les besoins en infrastructures.
2. Expliquez un avantage des corridors hydrogène.
3. Décrivez une difficulté associée aux systèmes de mobilité à hydrogène.

Normes pertinentes

- Normes SAE relatives au ravitaillement en hydrogène
- Normes ISO relatives à la mobilité hydrogène
- Directives de l'OMI relatives à la sécurité de l'hydrogène dans le transport maritime

5.5. Économie de l'hydrogène et cadres politiques

L'économie de l'hydrogène désigne la production, la distribution, le stockage et l'utilisation à grande échelle de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique majeur. Les gouvernements et les industries du monde entier élaborent des stratégies hydrogène afin de :

- réduire les émissions de carbone
- améliorer la sécurité énergétique
- soutenir la croissance industrielle
- développer les systèmes d'énergies renouvelables

Les politiques relatives à l'hydrogène contribuent à orienter :

- le développement des infrastructures
- la réglementation de la sécurité
- la planification des investissements
- la croissance du marché
- le déploiement des technologies

5.5.1. Feuilles de route internationales pour l'hydrogène

De nombreux pays et organisations ont élaboré des feuilles de route pour l'hydrogène qui définissent :

- des objectifs de production
- des objectifs en matière d'infrastructures
- des stratégies de transport
- des applications industrielles
- des plans de décarbonation

Ces feuilles de route soutiennent le développement à long terme du marché de l'hydrogène.

5.5.2. Cadres politiques et réglementaires

La réglementation relative à l'hydrogène traite :

- des exigences de sécurité
- de la protection de l'environnement
- des normes de qualité du carburant
- de la réglementation du transport
- de l'autorisation des infrastructures
- des mesures incitatives à l'investissement

Des règles claires renforcent :

- la confiance des investisseurs
- le développement des infrastructures
- la coopération internationale

5.5.3. Possibilités d'investissement

Les possibilités d'investissement dans l'hydrogène comprennent :

- la production d'hydrogène renouvelable
- les stations de ravitaillement
- les systèmes de pipelines
- les terminaux d'exportation
- les projets industriels liés à l'hydrogène
- les systèmes de mobilité à hydrogène

L'Afrique de l'Ouest présente un fort potentiel de développement de l'hydrogène en raison :

- de ses importantes ressources en énergies renouvelables
- de la croissance de la demande énergétique
- de ses emplacements stratégiques pour l'exportation
- de l'expansion de ses secteurs industriels

Les investissements dans l'hydrogène peuvent soutenir :

- la création d'emplois
- une croissance industrielle propre
- l'expansion des énergies renouvelables
- des systèmes de transport durables

Exercice

Un gouvernement prévoit d'introduire une stratégie nationale pour l'hydrogène.

Tâche :

1. Identifiez les principaux domaines d'action publique.
2. Expliquez pourquoi les mesures incitatives à l'investissement sont importantes.
3. Recommandez une application prioritaire de l'hydrogène pour l'Afrique de l'Ouest.

Normes et références pertinentes

- Feuilles de route sur l'hydrogène de l'International Energy Agency (IEA)
- Normes ISO relatives à l'hydrogène
- Cadres nationaux de stratégie hydrogène
- NFPA 2 — Hydrogen technologies code

5.6. Résumé du chapitre

Les infrastructures hydrogène soutiennent un large éventail d'applications industrielles, de transport et énergétiques, notamment la mobilité à pile à combustible, l'approvisionnement industriel en gaz, le stockage des énergies renouvelables et les systèmes d'exportation d'hydrogène. À mesure que les technologies hydrogène se développent, les industries intègrent de plus en plus l'hydrogène dans les transports propres, la production d'électricité et les procédés industriels bas carbone.

Un déploiement sûr de l'hydrogène exige des systèmes robustes de gestion de la sécurité comprenant l'évaluation des risques, l'analyse HAZOP, la planification des interventions d'urgence et les procédures de sécurité au travail. Les ingénieurs et les techniciens doivent acquérir des compétences pratiques en identification des dangers, prévention des fuites, systèmes d'arrêt d'urgence et pratiques d'exploitation sûres afin de garantir des infrastructures hydrogène fiables et sécurisées.

Les technologies émergentes telles que les réseaux hydrogène intelligents, les pipelines souterrains d'hydrogène, les systèmes LOHC et la surveillance fondée sur l'IA devraient améliorer l'efficacité, l'automatisation et la fiabilité à long terme des infrastructures hydrogène. Parallèlement, les systèmes mondiaux de mobilité à hydrogène, les corridors hydrogène et les projets d'hydrogène renouvelable créent de nouvelles possibilités économiques et industrielles.

La croissance de l'économie de l'hydrogène dépendra de cadres politiques efficaces, d'investissements dans les infrastructures, de normes internationales et de personnels techniques qualifiés. En Afrique de l'Ouest, les infrastructures hydrogène présentent un fort potentiel pour soutenir le développement industriel, l'intégration des énergies renouvelables, les systèmes de transport durables et les futurs marchés d'exportation d'hydrogène vert.

H2-A3

Systèmes de piles à combustible et intégration de l'hydrogène renouvelable

Présentation du cours

Ce cours dote les apprenants de niveau avancé de l'enseignement et de la formation techniques et professionnels (EFTP) de compétences en technologies de piles à combustible, intégration de l'hydrogène renouvelable, systèmes énergétiques hybrides et techniques de gestion de l'énergie. Il couvre les principes de fonctionnement des piles à combustible, la conception des systèmes, l'intégration des énergies renouvelables, les systèmes de commande, l'évaluation des performances et les applications industrielles pratiques.

Acquis d'apprentissage du cours

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

- Expliquer les principes et le fonctionnement des systèmes à pile à combustible.
- Comparer les principales technologies de piles à combustible et leurs applications industrielles.
- Concevoir et analyser des systèmes à pile à combustible intégrés à des sources d'énergie renouvelable.
- Appliquer des techniques de gestion de l'énergie, de commande, de maintenance et de dépannage aux systèmes à pile à combustible.
- Évaluer le rendement, les performances et la fiabilité opérationnelle des systèmes à pile à combustible.

H2-A3-1

Fondamentaux des technologies de piles à combustible

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène en énergie électrique, chaleur et eau. Contrairement aux systèmes de combustion conventionnels, elles assurent une conversion énergétique plus propre et plus efficace, avec de faibles émissions. Elles sont de plus en plus utilisées dans les transports, la production stationnaire d'électricité, les systèmes portables et l'intégration des énergies renouvelables. Ce chapitre présente les principes fondamentaux de fonctionnement, les différentes technologies, les composants et les caractéristiques de fonctionnement des piles à combustible.

1.1. Introduction aux piles à combustible

Une pile à combustible est un dispositif de conversion électrochimique de l'énergie qui produit de l'électricité en continu tant que du combustible et un oxydant lui sont fournis.

Les piles à combustible fonctionnent de manière comparable aux batteries, mais s'en distinguent parce qu'elles ne stockent pas l'énergie en interne. Elles produisent l'électricité par des réactions chimiques entre l'hydrogène et l'oxygène.

Les principales étapes du fonctionnement sont :

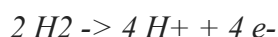
- le combustible hydrogène entre à l'anode
- l'oxygène ou l'air entre à la cathode
- les molécules d'hydrogène se dissocient en protons et en électrons
- les électrons circulent dans un circuit externe et produisent de la puissance électrique
- les protons traversent l'électrolyte
- de l'eau et de la chaleur sont produites comme sous-produits

Avantages des piles à combustible

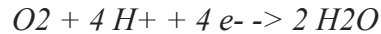
- Rendement élevé
- Faibles émissions de gaz à effet de serre
- Fonctionnement silencieux
- Conception modulaire
- Production électrique continue et fiable

Conversion électrochimique de l'énergie : les piles à combustible convertissent directement l'énergie chimique en énergie électrique par des réactions électrochimiques, sans combustion.

Réaction à l'anode : l'hydrogène se dissocie en protons et en électrons.



Réaction à la cathode : l'oxygène se combine avec les protons et les électrons pour former de l'eau.



Réaction globale de la pile à combustible :



L'hydrogène comme combustible pour les piles à combustible :

L'hydrogène est le combustible principal de nombreux systèmes à pile à combustible parce qu'il :

- possède un contenu énergétique élevé
- ne produit que de l'eau lors de la réaction dans la pile
- peut être produit à partir de ressources renouvelables
- contribue à des systèmes énergétiques propres

Les sources d'hydrogène comprennent :

- électrolyse de l'eau
- vaporeformage du gaz naturel
- conversion de la biomasse
- production d'hydrogène alimentée par l'énergie solaire
- production d'hydrogène alimentée par l'énergie éolienne

Hydrogène renouvelable

L'hydrogène renouvelable (hydrogène vert) est produit à l'aide d'électricité renouvelable provenant notamment du solaire et de l'éolien.

Applications des piles à combustible

a) Transport

- Véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)
- Autobus et camions
- Transport maritime

b) Production stationnaire d'électricité

- Systèmes d'alimentation de secours
- Production décentralisée
- Systèmes de soutien au réseau

c) Applications portables

- Groupes électrogènes portables
- Équipements militaires
- Systèmes de communication distants

1.2. Types de piles à combustible

Les technologies de piles à combustible sont classées selon l'électrolyte utilisé et leur température de fonctionnement.

1.2.1. Piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Caractéristiques

- Faible température de fonctionnement (60-80 °C)
- Démarrage rapide
- Densité de puissance élevée

Avantages

- Conception compacte
- Adaptée au transport
- Réponse rapide aux variations de charge

Applications

- Véhicules à pile à combustible
- Systèmes d'alimentation portables

1.2.2. Piles à combustible à oxyde solide (SOFC)

Caractéristiques

- Température de fonctionnement élevée (600-1 000 °C)
- Électrolyte céramique

Avantages

- Rendement élevé
- Possibilité d'utiliser plusieurs combustibles
- Adaptée aux systèmes de cogénération

Applications

- Production d'électricité industrielle
- Systèmes énergétiques décentralisés

1.2.3. Piles à combustible alcalines (AFC)

Caractéristiques

- Utilisation d'un électrolyte alcalin
- Rendement électrique élevé

Avantages

- Bonnes performances à basse température
- Réactions électrochimiques rapides

Applications

- Missions spatiales
- Systèmes militaires

1.2.4. Piles à combustible à carbonate fondu (MCFC)

Caractéristiques

- Fonctionnement à haute température (600-700 °C)
- Utilisation d'un électrolyte à carbonate fondu

Avantages

- Grande flexibilité vis-à-vis du combustible
- Adaptée à la production électrique de grande puissance

Applications

- Production d'électricité à l'échelle des services publics
- Systèmes énergétiques industriels

1.3. Composants d'une pile à combustible

Les piles à combustible comprennent plusieurs composants essentiels qui assurent la conversion électrochimique de l'énergie. La figure 1.1 illustre la structure d'un empilement comprenant plusieurs cellules raccordées en série, des plaques bipolaires et des canaux de refroidissement.

1.3.1. Anode et cathode

Anode : l'anode reçoit l'hydrogène, dissocie l'hydrogène en protons et en électrons, puis conduit les électrons vers le circuit externe.

Cathode : la cathode reçoit l'oxygène ou l'air, combine l'oxygène avec les protons et les électrons, et produit de l'eau.

1.3.2. Électrolytes et membranes

L'électrolyte conduit les ions entre les électrodes, empêche le passage interne des électrons et sépare les gaz côté anode et côté cathode.

Exemples

- Membrane polymère (PEMFC)
- Électrolyte céramique (SOFC)
- Électrolyte alcalin liquide (AFC)

1.3.3. Catalyseurs et couches de diffusion gazeuse

Catalyseurs : les catalyseurs accélèrent les réactions électrochimiques. Les matériaux catalytiques courants comprennent :

- Platine

- Nickel
- Palladium

1.3.4. Couches de diffusion gazeuse (GDL)

La couche de diffusion gazeuse (GDL) :

- répartit uniformément les gaz
- supporte les couches catalytiques
- favorise l'évacuation de l'eau et de la chaleur

1.3.5. Plaques bipolaires et structure de l'empilement

Plaques bipolaires : elles raccordent électriquement les cellules individuelles, distribuent les gaz et contribuent à l'évacuation de la chaleur.

Empilement de piles à combustible : plusieurs cellules sont raccordées en série afin d'augmenter la tension et la puissance de sortie.

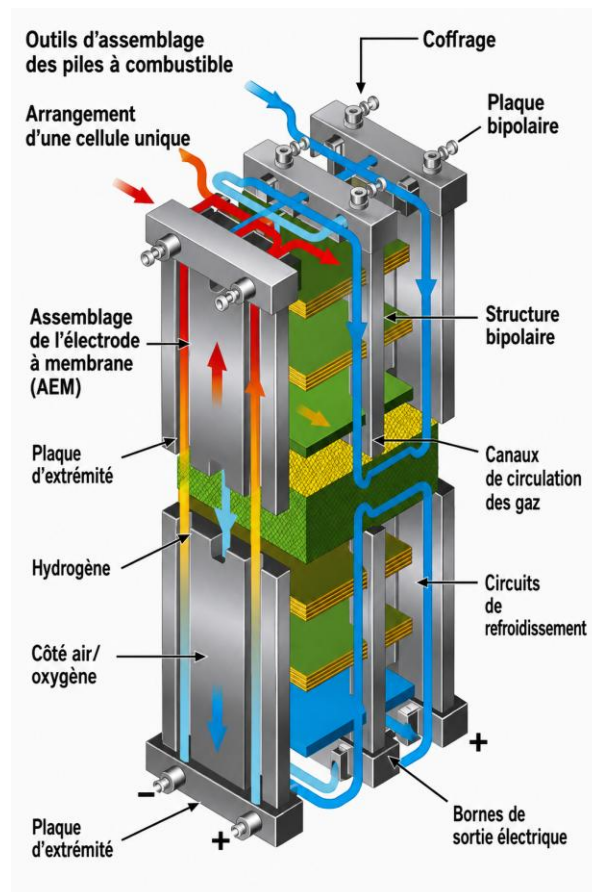


Figure 1.1 - Structure d'un empilement de piles à combustible

1.4. Caractéristiques de fonctionnement des piles à combustible

La compréhension des caractéristiques de fonctionnement est importante pour la conception et l'analyse des performances des piles à combustible.

Caractéristiques tension-courant : la tension d'une pile à combustible diminue lorsque le courant augmente en raison des pertes d'activation, des pertes ohmiques et des pertes de concentration.

Courbe de polarisation : une courbe de polarisation représente la relation entre la tension et la densité de courant.

Notions de rendement : le rendement des piles à combustible est généralement supérieur à celui des moteurs à combustion, car elles convertissent directement l'énergie en électricité. Le rendement est donné par :

$$\eta = (\text{energie electrique utile} / \text{energie du combustible en entree}) \times 100 \%$$

Facteurs influençant le rendement

- Température de fonctionnement
- Pureté du combustible
- Pression
- Conditions de charge

Effets de la température

- Une température plus élevée accélère les réactions.
- Une température excessive peut endommager les composants.

Effets de la pression

- Une pression plus élevée peut améliorer les performances.
- Les systèmes de compression augmentent le coût du système.

Utilisation du combustible et consommation d'hydrogène

Le taux d'utilisation du combustible indique le pourcentage d'hydrogène effectivement consommé dans le système. Il peut être calculé comme suit :

$$\text{Taux d'utilisation du combustible} = (\text{hydrogene consomme} / \text{hydrogene fourni}) \times 100 \%$$

Une utilisation efficace de l'hydrogène améliore le rendement du système et réduit les coûts d'exploitation.

1.5. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux de fonctionnement des piles à combustible et les processus électrochimiques utilisés pour convertir efficacement l'énergie chimique en énergie électrique. Les apprenants ont étudié l'hydrogène en tant que vecteur énergétique propre et durable, différents types de piles à combustible et leurs applications, ainsi que les principaux composants constituant un système. Le chapitre a également abordé les principales caractéristiques de fonctionnement et les notions de rendement, fournissant une base pour l'étude de l'intégration de l'hydrogène renouvelable, des systèmes énergétiques hybrides et des applications industrielles des piles à combustible.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez le principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

2. Distinguez les technologies PEMFC et SOFC.
3. Décrivez la fonction des électrolytes dans les piles à combustible.
4. Expliquez comment les piles à combustible convertissent l'énergie chimique en énergie électrique.
5. Présentez les avantages de l'hydrogène comme combustible.
6. Identifiez les principaux composants d'un empilement de piles à combustible.
7. Expliquez l'effet de la température sur les performances d'une pile à combustible.
8. Définissez le taux d'utilisation du combustible et le rendement du système.

H2-A3-2

Conception des systèmes à pile à combustible et analyse des performances

Les systèmes à pile à combustible sont conçus pour convertir l'énergie de l'hydrogène en puissance électrique utilisable de manière efficace et fiable. Une conception correcte exige de comprendre la configuration de l'empilement, la gestion thermique, les sous-systèmes auxiliaires et les performances en fonctionnement. L'analyse des performances aide en outre les ingénieurs à évaluer le rendement, à optimiser l'utilisation de l'hydrogène et à améliorer la fiabilité à long terme.

Ce chapitre présente la conception des empilements de piles à combustible, les composants des systèmes auxiliaires (Balance of Plant, BoP), les techniques de modélisation, les méthodes d'évaluation des performances et les stratégies de maintenance utilisées dans les systèmes modernes.

2.1. Conception de l'empilement de piles à combustible

2.1.1. Configuration des cellules et empilement

Une cellule élémentaire produit une tension relativement faible, généralement inférieure à 1 V. Pour obtenir une puissance plus élevée, plusieurs cellules sont assemblées pour former un empilement.

Configuration de l'empilement : les cellules peuvent être raccordées en série pour augmenter la tension ou en parallèle pour augmenter la capacité en courant. Les principaux composants comprennent les assemblages membrane-électrodes (MEA), les plaques bipolaires, les canaux de refroidissement, les canaux d'écoulement des gaz et les structures de compression.

Importance d'une conception correcte : une conception efficace augmente la puissance de sortie, améliore la stabilité thermique, réduit les pertes énergétiques et accroît la durabilité et la fiabilité.

2.1.2. Calculs de puissance de sortie

La puissance électrique d'une pile à combustible dépend de sa tension et de son courant de sortie. La puissance est obtenue par :

$$P = V \times I$$

où P est la puissance (W), V la tension (V) et I le courant (A).

La tension de l'empilement est calculée comme suit :

$$V_{stack} = N \times V_{cell}$$

où N est le nombre de cellules et V_{cell} la tension d'une cellule.

Facteurs influençant la puissance de sortie

- Débit d'alimentation en hydrogène
- Température de fonctionnement
- Pression

- Rendement de la cellule
- Résistance interne

2.1.3. Systèmes de gestion thermique

Les piles à combustible produisent de la chaleur en fonctionnement. Les systèmes de gestion thermique maintiennent une température optimale et évitent la surchauffe.

Fonctions de la gestion thermique

- Évacuation de la chaleur
- Stabilisation de la température
- Prévention de l'assèchement de la membrane
- Amélioration du rendement

Méthodes de refroidissement courantes

- Refroidissement par air
- Refroidissement liquide
- Échangeurs de chaleur
- Plaques de refroidissement

Importance de la régulation de température

- Réduction du rendement
- Endommagement de la membrane
- Dégradation du catalyseur
- Répartition inégale du courant

2.1.4. Systèmes d'alimentation en combustible

Les systèmes d'alimentation fournissent l'hydrogène à l'empilement de manière sûre et efficace. Leurs composants comprennent :

- réservoirs de stockage d'hydrogène
- détendeurs
- régulateurs de débit
- vannes et tuyauteries
- systèmes de recirculation du combustible

Exigences de distribution du combustible : le système doit maintenir un débit d'hydrogène constant, éviter la contamination, réguler la pression du combustible et garantir un fonctionnement sûr.

2.2. Composants des systèmes auxiliaires (BoP)

Le Balance of Plant (BoP), traduit ici par systèmes auxiliaires, regroupe tous les sous-systèmes nécessaires au fonctionnement de la pile au-delà de l'empilement lui-même. La figure 2.1 présente

l'intégration de l'alimentation en hydrogène, du refroidissement, de l'humidification, de l'onduleur et du système de commande.

2.2.1. Systèmes d'alimentation en hydrogène

Les systèmes d'alimentation en hydrogène assurent le stockage du combustible, la régulation de sa pression et son alimentation vers l'empilement.

Méthodes de stockage de l'hydrogène

- Bouteilles de gaz comprimé
- Réservoirs d'hydrogène liquide
- Stockage sur hydrures métalliques
- Systèmes de stockage souterrain

Considérations de sécurité

- Détection des fuites
- Systèmes de ventilation
- Soupapes de décharge
- Systèmes de protection incendie

2.2.2. Systèmes d'alimentation en air et d'humidification

Les piles à combustible ont besoin d'oxygène, généralement fourni par l'air atmosphérique.

Les composants du système d'alimentation en air comprennent :

- Compresseurs d'air
- Filtres
- Soufflantes
- Humidificateurs

L'humidification est importante parce qu'elle :

- évite l'assèchement de la membrane
- maintient la conductivité protonique
- améliore les performances de la pile

Difficultés

- Gestion de l'eau
- Maîtrise de la condensation
- Prévention de la contamination de l'air

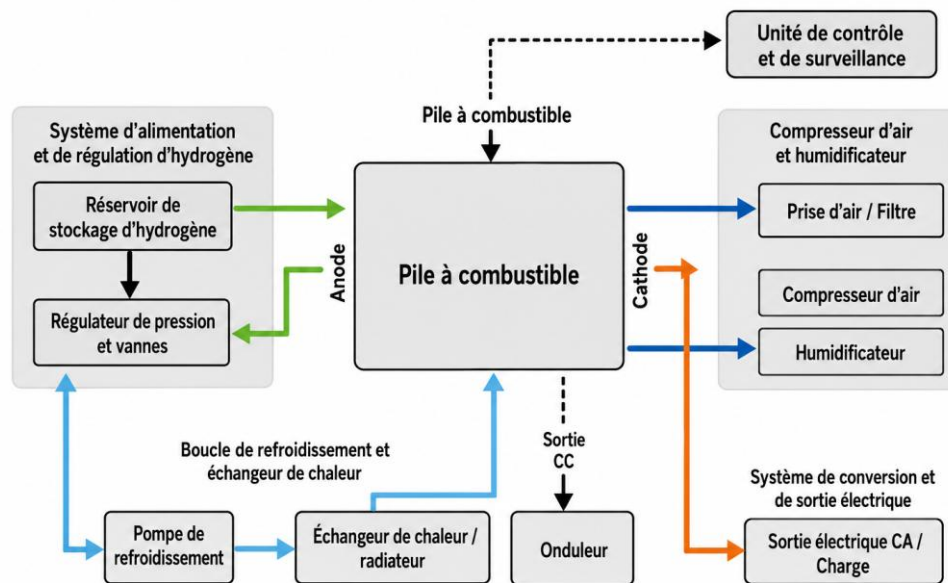


Figure 2.1 - Composants des systèmes auxiliaires (BoP) d'une pile à combustible

Systèmes de refroidissement

Les systèmes de refroidissement évacuent l'excès de chaleur produit en fonctionnement. Ils comprennent notamment :

- pompes
- radiateurs
- échangeurs de chaleur
- ventilateurs de refroidissement

Objectifs du refroidissement

- maintenir une température de fonctionnement stable
- éviter la surchauffe
- améliorer la durabilité de l'empilement

2.2.3. Systèmes de conditionnement de puissance

La sortie d'une pile à combustible doit souvent être convertie en une forme électrique utilisable. Les fonctions du conditionnement de puissance sont :

- régulation de la tension
- conversion CC-CC
- conversion CC-CA par onduleur
- contrôle de la qualité de l'énergie

Les principaux composants comprennent les onduleurs, convertisseurs, contrôleurs et unités de distribution de puissance.

Applications

- Intégration au réseau
- Véhicules électriques
- Systèmes électriques industriels

2.3. Modélisation et simulation des piles à combustible

La modélisation et la simulation permettent de prévoir le comportement d'une pile à combustible dans différentes conditions de fonctionnement. La figure 2.2 illustre les pertes d'activation, ohmiques et de concentration qui influencent les performances.

Modélisation tension-courant : la tension de la pile varie avec le courant en raison des pertes internes. Elle peut être exprimée par :

$$V = E - V_{act} - V_{ohmique} - V_{conc}$$

où E est la tension idéale de la cellule, V_{act} la perte d'activation, $V_{ohmique}$ la perte ohmique et V_{conc} la perte de concentration.

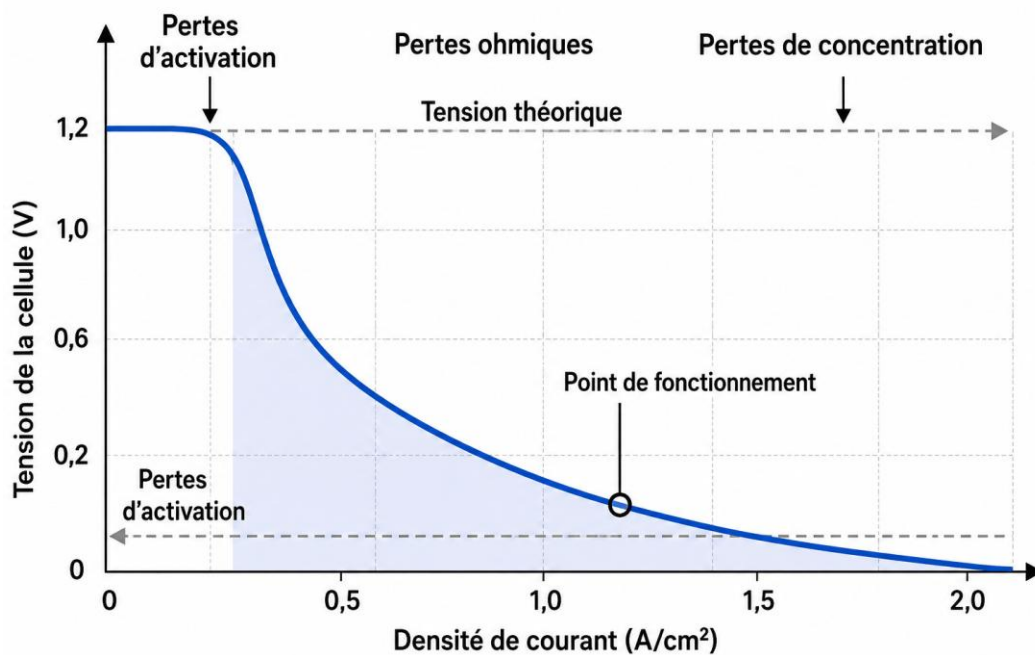


Figure 2.2 - Courbe de polarisation d'une pile à combustible

La modélisation est importante pour prévoir les performances, optimiser les conditions de fonctionnement et améliorer le rendement. Le rendement de la pile évalue l'efficacité de la conversion d'énergie et s'exprime par :

$$\eta = (P_{sortie} / P_{entree}) \times 100 \%$$

Facteurs influençant le rendement

- Pureté du combustible
- Température de fonctionnement

- Densité de courant
- Utilisation de l'hydrogène

2.3.1. Modélisation des performances dynamiques

Les modèles dynamiques simulent des conditions de fonctionnement variables. Les comportements dynamiques comprennent :

- réponse au démarrage
- variation de charge
- variations de température
- comportement transitoire de la tension

Applications

- Conception des systèmes de commande
- Intégration dans les systèmes énergétiques hybrides
- Surveillance en temps réel

2.3.2. Analyse de la réponse à la charge

Les piles à combustible doivent réagir efficacement aux variations de charge électrique. Les paramètres importants comprennent :

- temps de réponse
- stabilité de la tension
- fluctuation du courant
- qualité de l'énergie

Difficultés

- Variations brusques de charge
- Réponse retardée de l'alimentation en combustible
- Inertie thermique

2.4. Évaluation et optimisation des performances

L'évaluation des performances contribue à améliorer le rendement et la fiabilité des piles à combustible. Le rendement est mesuré en comparant la puissance électrique utile à l'énergie du combustible fournie au système.

Types de rendement

- Rendement électrique
- Rendement thermique
- Rendement global du système

Instruments de mesure

- Débitmètres
- Capteurs de tension
- Capteurs de courant
- Capteurs de température

2.4.1. Analyse de la densité de puissance

La densité de puissance correspond à la puissance produite par unité de surface ou de volume. Elle s'exprime par :

$$\text{Densité de puissance} = P / A$$

où P est la puissance de sortie et A la surface active de la cellule.

Une densité de puissance plus élevée :

- réduit l'encombrement du système
- améliore la portabilité
- réduit les coûts de matériaux

2.4.2. Optimisation de l'utilisation de l'hydrogène

Une utilisation efficace de l'hydrogène améliore l'économie et les performances du système. Le taux d'utilisation de l'hydrogène peut être défini comme suit :

$$U_H = (\text{hydrogene consomme} / \text{hydrogene fourni}) \times 100 \%$$

Méthodes d'optimisation

- Régulation du débit
- Régulation de la pression
- Recirculation du combustible
- Amélioration des catalyseurs

2.4.3. Analyse de la dégradation des performances

Les performances d'une pile à combustible diminuent progressivement au fil du temps. Les causes de dégradation comprennent :

- Empoisonnement du catalyseur
- Assèchement de la membrane
- Corrosion
- Contraintes thermiques

Indicateurs de dégradation

- Baisse de tension
- Réduction du rendement
- Augmentation de la résistance

- Fuite de gaz

2.5. Dégradation et maintenance des piles à combustible

La fiabilité à long terme dépend d'une maintenance appropriée et d'une bonne maîtrise des mécanismes de dégradation.

2.5.1. Dégradation des catalyseurs

Les catalyseurs perdent progressivement de leur efficacité en raison de la contamination, de l'agglomération des particules et des dépôts de carbone. Les effets sont :

- réduction de la vitesse de réaction
- diminution de la puissance de sortie
- augmentation des pertes de tension

2.5.2. Vieillessement de la membrane

Les membranes se dégradent en raison :

- des cycles thermiques
- des attaques chimiques
- des contraintes mécaniques
- des cycles d'assèchement et d'hydratation

Cette dégradation entraîne une réduction de la conductivité protonique, un passage croisé des gaz et, à terme, la défaillance du système.

2.5.3. Mécanismes de corrosion

La corrosion affecte les composants métalliques tels que les plaques bipolaires et les connecteurs. Les principales causes sont :

- l'exposition à l'humidité
- les réactions électrochimiques
- des conditions de fonctionnement acides

Méthodes de prévention

- Revêtements protecteurs
- Matériaux résistant à la corrosion
- Bonne maîtrise du refroidissement et de l'humidité

2.5.4. Techniques de maintenance préventive

La maintenance préventive améliore la fiabilité en exploitation et la durée de vie du système. Les principales activités comprennent :

- inspection des fuites

- remplacement des filtres
- maintenance du système de refroidissement
- étalonnage des capteurs
- inspection des connexions électriques

Avantages

- Réduction des temps d'arrêt
- Amélioration de la sécurité
- Augmentation du rendement
- Allongement de la durée de vie du système

2.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les apprenants ont étudié la conception et l'analyse des performances des systèmes à pile à combustible, notamment la configuration de l'empilement, les calculs de puissance et les techniques de gestion thermique. Le chapitre a également présenté les systèmes auxiliaires (BoP), notamment l'alimentation en hydrogène, le refroidissement, l'humidification et le conditionnement de puissance. Les apprenants ont aussi abordé la modélisation et la simulation, l'évaluation et l'optimisation des performances, ainsi que les mécanismes courants de dégradation. Des stratégies de maintenance préventive ont enfin été présentées afin d'améliorer la fiabilité, le rendement et la durée de vie opérationnelle dans les applications d'hydrogène renouvelable.

Questions de révision

1. Expliquez l'objectif de la configuration d'un empilement de piles à combustible.
2. Décrivez la fonction des systèmes de gestion thermique dans les piles à combustible.
3. Identifiez les principaux composants des systèmes auxiliaires (BoP).
4. Expliquez les causes des pertes d'activation, des pertes ohmiques et des pertes de concentration.
5. Expliquez l'importance de l'humidification dans les piles PEMFC.
6. Définissez la densité de puissance et expliquez son importance.
7. Décrivez les mécanismes courants de dégradation des piles à combustible.
8. Expliquez les techniques de maintenance préventive utilisées dans les systèmes à pile à combustible.

H2-A3-3

Intégration de l'hydrogène renouvelable et des systèmes énergétiques hybrides

L'intégration de l'hydrogène renouvelable associe les systèmes à pile à combustible à des technologies renouvelables telles que le solaire et l'éolien afin de créer des systèmes énergétiques durables et fiables. Les systèmes hybrides améliorent l'efficacité énergétique, réduisent les émissions de gaz à effet de serre et renforcent la fiabilité de l'alimentation grâce à la coordination de plusieurs sources d'énergie et systèmes de stockage. Ce chapitre présente les systèmes hybrides solaire-pile à combustible et éolien-pile à combustible, l'intégration du stockage d'hydrogène, les configurations hybrides et les stratégies de gestion de l'énergie.

3.1. Systèmes hybrides solaire - pile à combustible

3.1.1. Intégration PV - pile à combustible

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) convertissent directement le rayonnement solaire en électricité. Lorsqu'ils sont intégrés à des piles à combustible, l'excédent d'énergie solaire peut alimenter un électrolyseur pour produire de l'hydrogène, qui sera ensuite reconverti en électricité par la pile à combustible. La figure 3.1 montre un système hybride comprenant des panneaux PV, un électrolyseur, un stockage d'hydrogène, une pile à combustible, une batterie et une charge.

Composants

- Champ solaire PV
- Régulateur de charge
- Électrolyseur
- Réservoir de stockage d'hydrogène
- Empilement de piles à combustible
- Système de stockage sur batterie
- Onduleur et charge

Principe de fonctionnement

- Lorsque le rayonnement solaire est élevé, les panneaux PV produisent de l'électricité.
- L'excédent d'électricité alimente l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène.
- L'hydrogène est stocké pour une utilisation ultérieure.
- Lorsque la production solaire est faible ou pendant la nuit, la pile à combustible produit de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

Avantages

- Alimentation énergétique continue

- Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles
- Meilleure valorisation des énergies renouvelables
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre

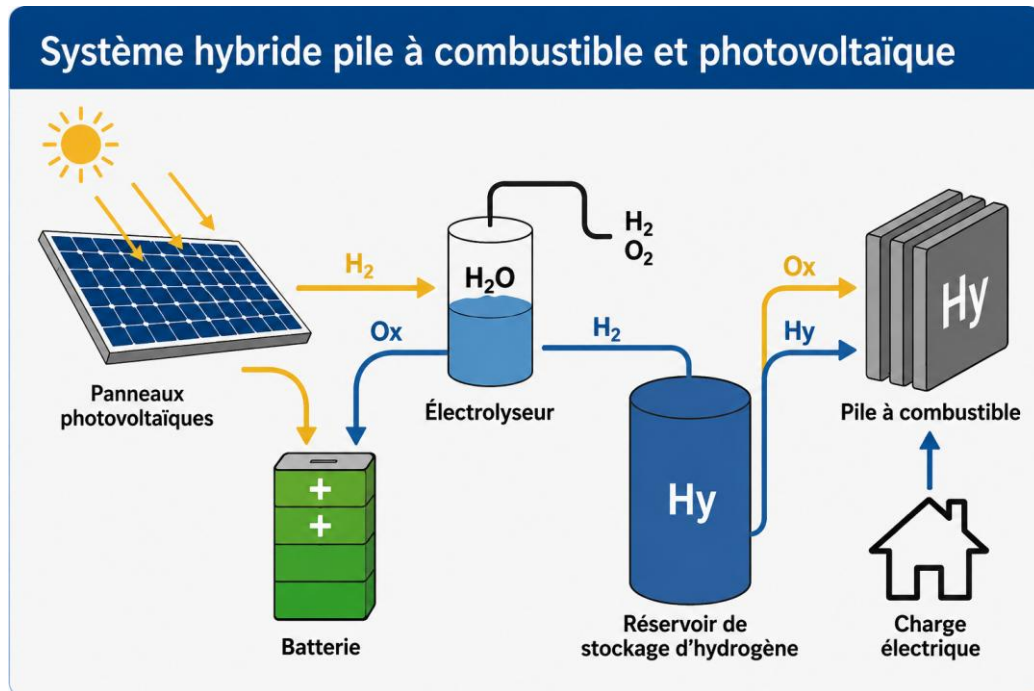


Figure 3.1 - Système hybride solaire PV - pile à combustible

3.1.2. Configurations de bus CC

Le bus CC constitue le point central de raccordement électrique d'un système énergétique hybride. Les principales configurations sont :

- Bus CC commun
- Bus CC distribué
- Architecture multibus

Fonctions du bus CC

- Intègre les sources d'énergie renouvelable
- Transfère la puissance électrique entre les composants
- Assure la charge et la décharge des batteries
- Stabilise la tension du système

Avantages des systèmes à bus CC

- Réduction des pertes de conversion
- Amélioration du rendement
- Simplification de l'intégration du système
- Gestion flexible de la puissance

3.1.3. Systèmes hybrides assistés par batterie

Les batteries sont souvent associées aux piles à combustible pour améliorer la stabilité du système et sa capacité de stockage d'énergie. Elles permettent de :

- stocker l'excédent d'énergie renouvelable
- fournir une puissance de pointe de courte durée
- améliorer la réponse transitoire
- stabiliser les fluctuations de tension

Avantages de l'intégration d'une batterie

- Meilleure réponse à la charge
- Réduction des sollicitations de la pile à combustible
- Fiabilité accrue du système
- Meilleur équilibrage énergétique

Types de batteries courants

- Batteries lithium-ion
- Batteries plomb-acide
- Batteries nickel-hydrure métallique

3.2. Systèmes hybrides éolien - pile à combustible

3.2.1. Intégration des éoliennes

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Dans un système éolien-pile à combustible, l'excédent de puissance éolienne est utilisé pour produire de l'hydrogène et le stocker. La figure 3.2 montre le flux d'énergie entre l'éolienne, l'électrolyseur, le stockage d'hydrogène et la pile à combustible.

Principaux composants

- Générateur éolien
- Convertisseur de puissance
- Electrolyseur
- Système de stockage d'hydrogène
- Empilement de piles à combustible
- Système de commande

Principe de fonctionnement

- Les éoliennes produisent de l'électricité.
- L'excédent d'électricité alimente les électrolyseurs.
- L'hydrogène est stocké pour une utilisation ultérieure.

- Les piles à combustible fournissent une alimentation de secours lorsque la production éolienne diminue.

Avantages

- Fiabilité énergétique améliorée
- Capacité de stockage d'énergie de longue durée
- Réduction de l'écrêtement de la production renouvelable

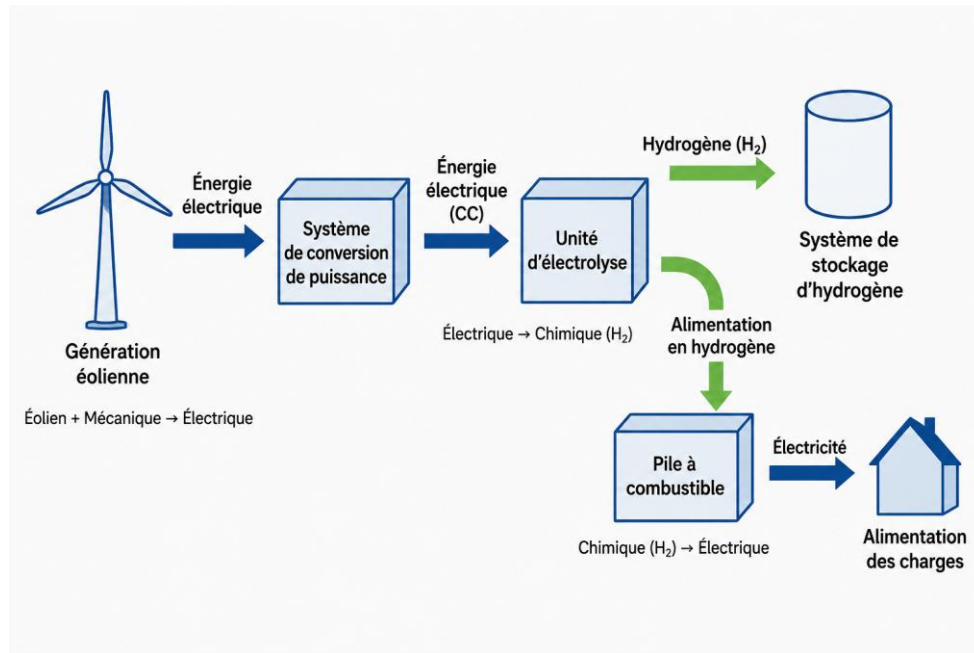


Figure 3.2 - Système éolien - hydrogène - pile à combustible

3.2.2. Gestion des fluctuations de puissance

Les systèmes à énergies renouvelables subissent des fluctuations dues aux conditions météorologiques changeantes. Les principales causes sont :

- Variation de la vitesse du vent
- Couverture nuageuse
- Variations de charge

Techniques de gestion

- Intégration du stockage par batterie
- Contrôleurs intelligents
- Stockage d'énergie sous forme d'hydrogène
- Régulation par électronique de puissance

Objectifs

- Maintenir la stabilité de la tension
- Assurer une alimentation continue
- Protéger les composants du système

3.2.3. Cycle production-stockage-utilisation de l'hydrogène

Le cycle de l'hydrogène constitue le fondement des systèmes à hydrogène renouvelable. Les étapes sont :

1. Production d'électricité renouvelable
2. Électrolyse de l'eau
3. Stockage de l'hydrogène
4. Production d'électricité par pile à combustible

Processus d'électrolyse :



Conversion dans la pile à combustible :



Le cycle de l'hydrogène est important parce qu'il :

- permet le stockage des énergies renouvelables
- soutient des systèmes énergétiques propres
- réduit les pertes d'énergie renouvelable

3.3. Intégration du stockage d'hydrogène

3.3.1. Stockage d'hydrogène comprimé

Le stockage d'hydrogène comprimé est la méthode la plus courante pour le stockage de l'hydrogène gazeux.

Caractéristiques

- Bouteilles haute pression
- Réservoirs composites légers
- Pressions comprises entre 350 et 700 bar

Avantages

- Technologie mature
- Distribution rapide de l'hydrogène
- Adapté au transport

Difficultés

- Besoin énergétique élevé pour la compression
- Exigences de sécurité
- Coût du stockage

3.3.2. Régulation de l'alimentation en combustible

Les systèmes d'alimentation en hydrogène régulent la pression et le débit afin d'assurer un fonctionnement sûr et stable.

Principaux composants

- Détendeurs
- Vannes
- Régulateurs de débit
- Capteurs de sécurité

Fonctions

- Maintenir un débit de combustible constant
- Éviter les instabilités de pression
- Protéger les composants de la pile à combustible

Exigences de sécurité

- Systèmes de détection des fuites
- Systèmes de ventilation
- Mécanismes d'arrêt d'urgence

Dimensionnement du stockage d'hydrogène

Le dimensionnement du stockage détermine la quantité d'hydrogène nécessaire au fonctionnement du système.

Facteurs influençant la taille du stockage

- Demande de charge
- Durée de secours requise
- Rendement de la pile à combustible
- Disponibilité des énergies renouvelables

Équation de l'énergie de l'hydrogène

$$E = m \times HHV$$

où E est l'énergie stockée, m la masse d'hydrogène et HHV le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène.

Importance d'un dimensionnement correct

- Assure un fonctionnement fiable
- Réduit le coût du stockage
- Améliore le rendement du système

3.4. Configurations des systèmes hybrides

3.4.1. Systèmes hybrides raccordés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau fonctionnent en parallèle avec le réseau public d'électricité.

Caractéristiques

- Échange d'électricité avec le réseau
- Soutien à l'intégration des énergies renouvelables
- Amélioration de la fiabilité de l'alimentation

Avantages

- Réduction du coût de l'énergie
- Disponibilité d'une alimentation de secours
- Flexibilité accrue du système

Applications

- Bâtiments commerciaux
- Réseaux intelligents
- Installations industrielles

3.4.2. Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes fonctionnent sans raccordement au réseau. Leurs composants comprennent :

- source d'énergie renouvelable
- système à pile à combustible
- stockage d'hydrogène
- banc de batteries
- contrôleur de charge

Applications

- Villages isolés
- Télécommunications
- Électrification rurale

Avantages

- Indépendance énergétique
- Adaptation aux sites isolés
- Alimentation de secours fiable

3.4.3. Systèmes hybrides multisources

Les systèmes multisources combinent plusieurs technologies de production d'énergie. Les sources possibles sont :

- Solaire PV
- Éoliennes
- Piles à combustible
- Batteries
- Groupes électrogènes diesel

Avantages

- Fiabilité améliorée
- Meilleure disponibilité de l'énergie
- Réduction des effets de la variabilité des renouvelables

Difficultés

- Systèmes de commande complexes
- Coût d'installation plus élevé
- Besoins de coordination énergétique

3.5. Stratégies de gestion de l'énergie

3.5.1. Techniques de gestion de la charge

La gestion de la charge contrôle la demande d'énergie et la distribution de puissance dans le système hybride.

Objectifs

- Équilibrer la production et la consommation d'énergie
- Réduire la demande de pointe
- Améliorer le rendement du système

Techniques

- Priorisation des charges
- Écrêtement des pointes
- Déplacement de charge
- Planification intelligente

3.5.2. Systèmes de commande intelligents

Les contrôleurs intelligents automatisent les processus de gestion de l'énergie. Leurs fonctions comprennent :

- Surveillance des conditions du système
- Optimisation du flux de puissance
- Commande de la charge et de la décharge
- Protection des composants du système

Méthodes de commande courantes

- Commande par logique floue
- Commande PID
- Algorithmes d'intelligence artificielle
- Systèmes à microcontrôleurs

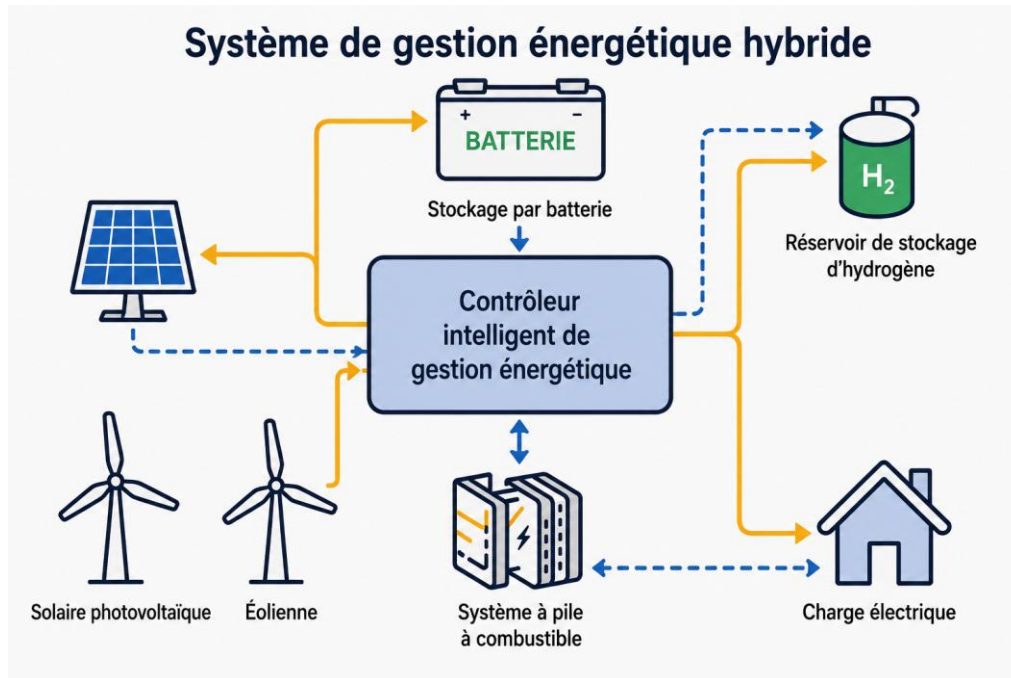


Figure 3.3 - Système hybride de gestion de l'énergie

3.5.3. Équilibrage énergétique en temps réel

L'équilibrage énergétique assure un fonctionnement stable entre la production et la consommation de puissance.

Fonctions

- Adapter l'offre d'énergie à la demande
- Coordonner les systèmes renouvelables et de stockage
- Stabiliser la tension et la fréquence du système

Avantages

- Amélioration du rendement
- Réduction des pertes d'énergie
- Fiabilité accrue du système

3.5.4. Applications de la réponse de la demande

La réponse de la demande (demand response) ajuste la consommation d'électricité selon l'état du système.

Applications

- Intégration aux réseaux intelligents
- Commande des charges industrielles
- Optimisation des énergies renouvelables

Avantages

- Réduction de la demande de pointe
- Amélioration de la stabilité du réseau
- Meilleure valorisation des énergies renouvelables

3.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les apprenants ont étudié l'intégration de l'hydrogène renouvelable dans des systèmes hybrides associant solaire PV, éoliennes, piles à combustible, batteries et stockage d'hydrogène. Le chapitre a expliqué le fonctionnement des systèmes hybrides solaire-pile à combustible et éolien-pile à combustible, les méthodes de production et de stockage de l'hydrogène et différentes configurations, notamment les systèmes raccordés au réseau et autonomes. Les apprenants ont également exploré la gestion de charge, les systèmes de commande intelligents, l'équilibrage en temps réel et la réponse de la demande, qui améliorent le rendement, la fiabilité et la durabilité des systèmes à hydrogène renouvelable.

Questions de révision

1. Expliquez le principe de fonctionnement d'un système hybride solaire PV-pile à combustible.
2. Décrivez le rôle des batteries dans les systèmes énergétiques hybrides.
3. Présentez le cycle production-stockage-utilisation de l'hydrogène.
4. Expliquez les avantages des systèmes hybrides éolien-pile à combustible.
5. Comparez les systèmes hybrides raccordés au réseau et les systèmes autonomes.
6. Décrivez l'importance du dimensionnement du stockage d'hydrogène.
7. Expliquez l'objectif des systèmes intelligents de gestion de l'énergie.
8. Discutez du rôle de la réponse de la demande dans les systèmes hybrides à énergies renouvelables.

H2-A3-4

Applications des piles à combustible et systèmes de commande

4.1. Applications des piles à combustible dans les systèmes électriques

Les systèmes à pile à combustible sont de plus en plus utilisés dans la production d'électricité, les transports et les applications énergétiques intelligentes en raison de leur rendement élevé, de leurs faibles émissions et de leur fonctionnement fiable. Des systèmes de commande et de surveillance efficaces sont essentiels pour maintenir un fonctionnement sûr et performant dans des conditions variables. Ce chapitre présente les applications en production stationnaire et dans les transports, les technologies de commande, les méthodes de surveillance et de diagnostic ainsi que les principales normes de sécurité et procédures d'exploitation. La figure 4.1 présente l'architecture d'un système de puissance comprenant un empilement, un onduleur, un stockage, un contrôleur et des charges connectées.

4.1.1. Production décentralisée à pile à combustible

La production décentralisée désigne des systèmes de production d'électricité de petite ou moyenne puissance situés à proximité du point de consommation.

Caractéristiques

- Production locale
- Réduction des pertes de transport
- Amélioration de la fiabilité de l'alimentation
- Faible impact environnemental

Applications

- Bâtiments résidentiels
- Installations commerciales
- Sites industriels
- Systèmes énergétiques isolés

Avantages

- Rendement élevé
- Fonctionnement silencieux
- Extension modulaire
- Alimentation continue

4.1.2. Systèmes d'alimentation de secours

Les piles à combustible sont largement utilisées comme sources d'alimentation de secours pour des installations critiques. Les composants comprennent :

- empilement de piles à combustible

- stockage d'hydrogène
- système de soutien par batterie
- unité de conditionnement de puissance

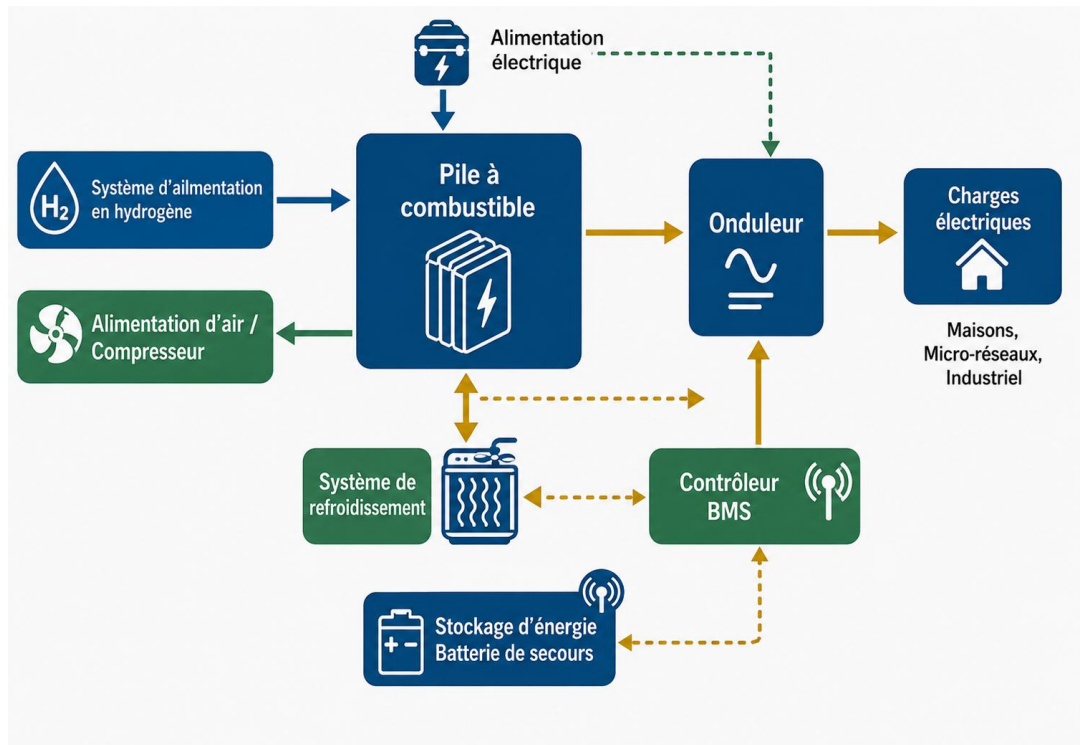


Figure 4.1 - Architecture d'un système de puissance à pile à combustible

Applications

- Hôpitaux
- Centres de données
- Tours de télécommunication
- Installations d'intervention d'urgence

Avantages

- Alimentation de secours fiable
- Longue durée de fonctionnement
- Réduction de la dépendance aux groupes diesel

4.1.3. Microréseaux et réseaux intelligents

Les piles à combustible soutiennent les systèmes énergétiques décentralisés dans les applications de réseau intelligent.

Caractéristiques d'un microréseau

- Production locale d'énergie
- Intégration des énergies renouvelables
- Systèmes de commande intelligents

- Capacité de stockage d'énergie

Rôles des piles à combustible dans les réseaux intelligents

- Équilibrage de la charge
- Soutien pendant les pointes de demande
- Stabilisation de la tension
- Alimentation de secours

Avantages

- Résilience accrue du réseau
- Réduction des émissions de carbone
- Fiabilité énergétique améliorée

4.1.4. Cogénération (CHP)

Les systèmes de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP) valorisent à la fois l'électricité et la chaleur résiduelle produites par la pile à combustible.

Principe de fonctionnement

- La pile à combustible produit de l'électricité.
- La chaleur résiduelle est récupérée pour le chauffage ou un procédé thermique.
- Le rendement global du système augmente de manière significative.

$$\eta_{CHP} = (P_{elec} + Q_{chaleur}) / \text{energie_du_combustible} \times 100 \%$$

Applications

- Chauffage résidentiel
- Procédés industriels
- Bâtiments commerciaux

4.2. Applications dans les transports

4.2.1. Véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)

Les véhicules électriques à pile à combustible utilisent l'hydrogène pour produire l'électricité alimentant leurs moteurs électriques. La figure 4.2 présente la chaîne de traction avec le réservoir d'hydrogène, la pile à combustible, la batterie, le moteur et l'électronique de puissance.

Principaux composants

- Réservoir de stockage d'hydrogène
- Empilement de piles à combustible
- Système de batterie
- Moteur électrique
- Électronique de puissance

Avantages

- Aucune émission à l'échappement
- Ravitaillement rapide
- Grande autonomie
- Fonctionnement silencieux

Difficultés

- Infrastructures hydrogène encore limitées
- Coût initial élevé
- Contraintes liées au stockage de l'hydrogène

4.2.2. Autobus et camions à pile à combustible

Les systèmes de transport lourd utilisent de plus en plus la technologie des piles à combustible.

Avantages

- Rendement énergétique élevé
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre
- Grande autonomie en service
- Ravitaillement rapide

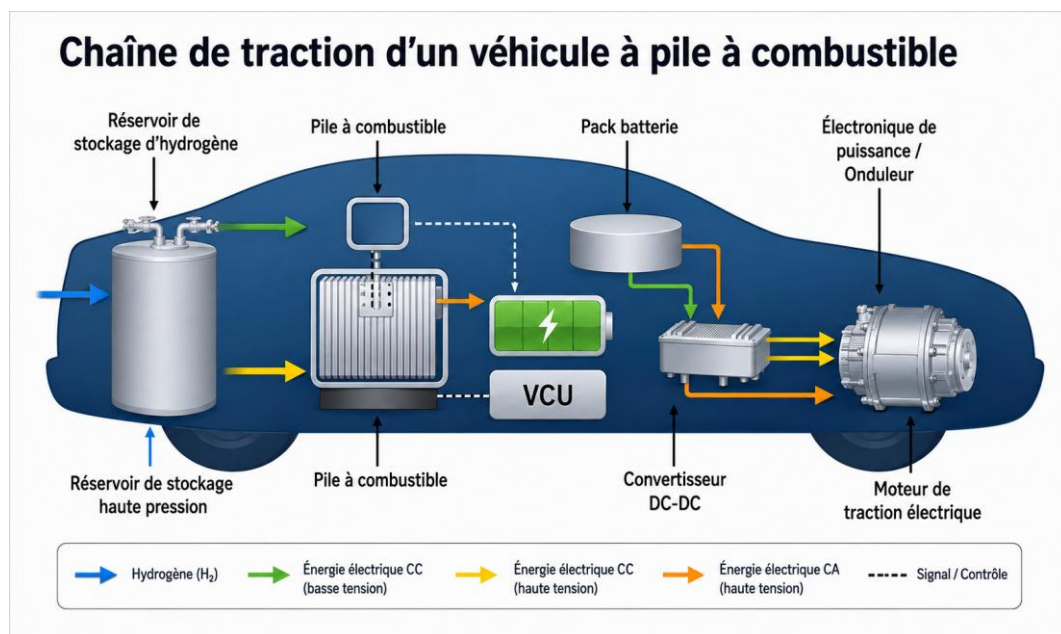


Figure 4.2 - Chaîne de traction d'un véhicule à pile à combustible

Applications

- Autobus de transport public
- Transport de marchandises
- Opérations logistiques

Les camions et autobus à pile à combustible contribuent à réduire les émissions dans les grands réseaux de transport.

4.2.3. Applications maritimes et aéronautiques

Les piles à combustible apparaissent comme des systèmes de puissance alternatifs dans les secteurs maritime et aéronautique.

a) Applications maritimes

- Navires à pile à combustible
- Sous-marins
- Systèmes d'alimentation dans les ports

b) Applications aéronautiques

- Systèmes auxiliaires de puissance pour aéronefs
- Aéronefs hybrides-électriques
- Véhicules aériens sans pilote (UAV)

Avantages

- Réduction des émissions
- Réduction des nuisances sonores
- Amélioration de l'efficacité énergétique

4.3. Systèmes de commande des piles à combustible

4.3.1. Commande de la tension et du courant

Les systèmes de commande régulent la sortie électrique afin d'assurer un fonctionnement stable.

Objectifs

- Maintenir une tension stable
- Réguler le courant
- Éviter les conditions de surcharge

Méthodes de commande

- Commande en boucle fermée
- Modulation de largeur d'impulsion (PWM)
- Commande par convertisseur CC-CC

Une commande électrique appropriée améliore le rendement du système, la qualité de l'énergie et la protection des composants.

4.3.2. Systèmes de gestion de la puissance

La gestion de puissance coordonne les flux d'énergie entre les piles à combustible, les batteries et les charges.

Fonctions

- Distribution de l'énergie
- Commande de la charge de la batterie
- Priorisation des charges
- Optimisation du rendement

Avantages

- Fiabilité améliorée du système
- Meilleure utilisation du combustible
- Réduction des pertes d'énergie

4.3.3. Commande de la température et de la pression

Les piles à combustible nécessitent des conditions de fonctionnement régulées pour atteindre leurs performances optimales.

a) Fonctions de la commande de température

- Évacuation de la chaleur
- Équilibrage thermique
- Prévention de la surchauffe

b) Fonctions de la commande de pression

- Réguler les débits d'hydrogène et d'air
- Maintenir la stabilité de l'empilement
- Améliorer l'efficacité des réactions

Dispositifs de commande

- Pompes de refroidissement
- Échangeurs de chaleur
- Détendeurs
- Régulateurs de débit

4.3.4. Systèmes de commande de supervision

Les systèmes de supervision surveillent et coordonnent le fonctionnement global des piles à combustible.

Fonctions

- Surveillance en temps réel
- Diagnostic du système
- Enregistrement des données
- Gestion des défauts

Technologies courantes

- Automates programmables (PLC)
- Systèmes SCADA
- Contrôleurs embarqués
- Systèmes de surveillance fondés sur l'Internet des objets (IoT)

4.4. Surveillance et diagnostic

4.4.1. Technologies de capteurs

Les capteurs fournissent des informations en temps réel sur le fonctionnement. Les capteurs courants comprennent :

- Capteurs de température
- Capteurs de pression
- Capteurs de fuite d'hydrogène
- Capteurs de tension et de courant
- Capteurs d'humidité

Les capteurs permettent :

- d'améliorer la sécurité de fonctionnement
- de détecter les conditions anormales
- d'optimiser les performances du système

4.4.2. Méthodes de détection des défauts

Les systèmes de détection identifient les problèmes avant qu'ils n'entraînent des défaillances majeures.

Défauts courants

- Fuite de combustible
- Assèchement de la membrane
- Défaillance du refroidissement
- Court-circuit électrique

Techniques de détection

- Analyse des signaux
- Diagnostic fondé sur des modèles
- Surveillance par capteurs
- Méthodes d'intelligence artificielle

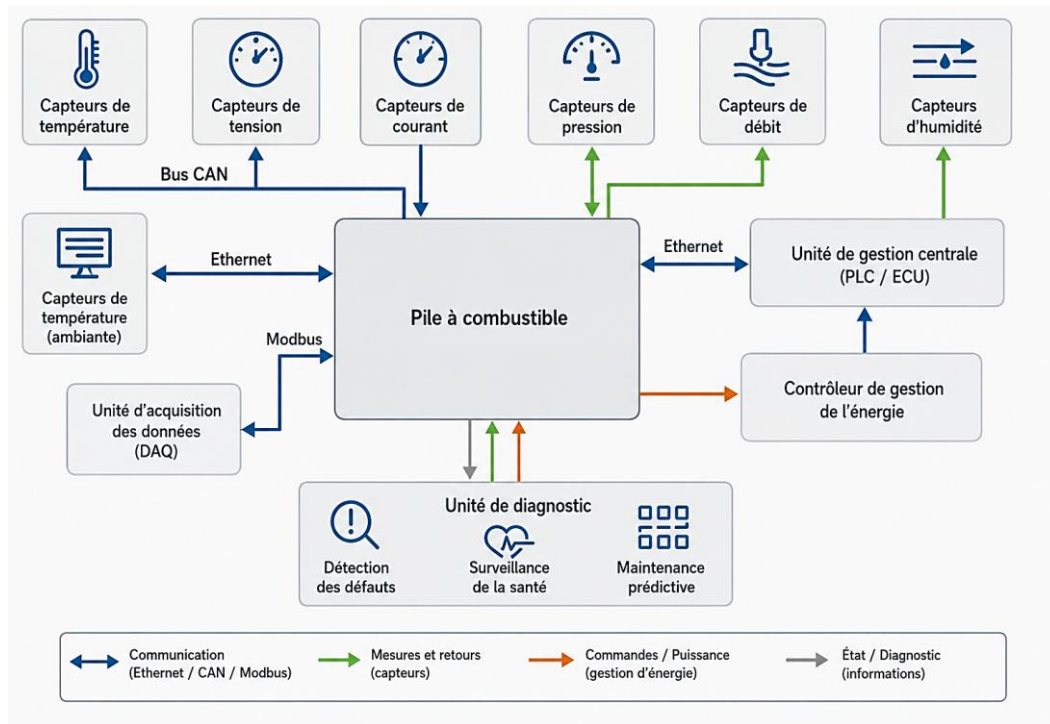


Figure 4.3 - Système de surveillance et de commande d'une pile à combustible

4.4.3. Systèmes de surveillance des performances

Les systèmes de surveillance des performances évaluent en continu le fonctionnement des piles à combustible. Les paramètres surveillés sont :

- Tension de sortie
- Courant de sortie
- Consommation d'hydrogène
- Répartition de la température
- Rendement du système

Avantages

- Fiabilité améliorée
- Identification précoce des défauts
- Meilleure planification de la maintenance

4.4.4. Maintenance prédictive

La maintenance prédictive exploite les données du système afin de prévoir les défaillances futures.

Objectifs

- Réduire les temps d'arrêt
- Allonger la durée de vie des composants
- Réduire les coûts de maintenance

Techniques prédictives

- Analyse de données

- Apprentissage automatique
- Analyse des tendances
- Surveillance de l'état

4.5. Normes de sécurité et procédures d'exploitation

4.5.1. Sécurité hydrogène dans les systèmes à pile à combustible

L'hydrogène est hautement inflammable et exige des mesures de sécurité strictes.

Risques

- Fuites de gaz
- Risques d'incendie
- Risques liés au stockage haute pression

Mesures de sécurité

- Systèmes de détection des fuites
- Ventilation appropriée
- Arrête-flammes
- Soupapes de décharge

4.5.2. Systèmes d'arrêt d'urgence

Les systèmes d'urgence arrêtent automatiquement le fonctionnement en cas de condition dangereuse.

Déclencheurs d'arrêt

- Fuite d'hydrogène
- Température excessive
- Anomalie de pression
- Défaut électrique

Fonctions

- Isoler l'alimentation en combustible
- Déconnecter les circuits électriques
- Activer les alarmes

4.5.3. Normes internationales de sécurité

Les systèmes à pile à combustible sont soumis à des normes internationales visant à garantir un fonctionnement fiable. Les principaux organismes cités dans le document source sont :

- ISO - Organisation internationale de normalisation
- IEC - Commission électrotechnique internationale
- SAE International

- NFPA - National Fire Protection Association

Domaines couverts

- Stockage de l'hydrogène
- Essais des piles à combustible
- Sécurité électrique
- Systèmes de transport

4.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les apprenants ont étudié les applications des piles à combustible dans la production décentralisée, l'alimentation de secours, les réseaux intelligents, les transports et les systèmes de cogénération. Le chapitre a expliqué les systèmes de commande de la tension, du courant, de la température et de la pression. Les apprenants ont également exploré les technologies de surveillance et de diagnostic, notamment les capteurs, la détection des défauts, la surveillance des performances et la maintenance prédictive. Les procédures de sécurité hydrogène, les systèmes d'arrêt d'urgence et les normes internationales ont aussi été abordés afin de garantir un fonctionnement sûr et fiable.

Questions de révision

1. Expliquez le rôle des piles à combustible dans la production décentralisée d'électricité.
2. Décrivez le fonctionnement d'un véhicule électrique à pile à combustible (FCEV).
3. Expliquez l'importance des systèmes de gestion de la puissance dans les applications à pile à combustible.
4. Expliquez les fonctions des systèmes de commande de supervision.
5. Identifiez les capteurs courants utilisés dans les piles à combustible et leurs applications.
6. Décrivez les techniques de maintenance prédictive utilisées dans les systèmes à pile à combustible.
7. Expliquez les risques liés à l'hydrogène et les méthodes de protection.
8. Discutez de l'importance des normes internationales de sécurité dans les applications des piles à combustible.

H2-A3-5

Analyse technico-économique, tendances émergentes et applications futures

5.1. Analyse économique des systèmes à pile à combustible

Le développement des technologies de piles à combustible et de l'hydrogène dépend non seulement des performances techniques, mais aussi de la faisabilité économique, de la durabilité environnementale et de cadres politiques favorables. Les progrès des technologies de piles à combustible, des systèmes à hydrogène renouvelable et des applications énergétiques intelligentes façonnent l'avenir des systèmes énergétiques propres. Ce chapitre examine les aspects économiques et environnementaux des piles à combustible, les technologies émergentes, les applications futures de l'hydrogène et les tendances de l'économie mondiale de l'hydrogène.

5.1.1. Coûts d'investissement et coûts d'exploitation

Les systèmes à pile à combustible comportent des coûts d'investissement initiaux et des dépenses d'exploitation. La figure 5.1 illustre la contribution de l'empilement, de l'approvisionnement en hydrogène, du refroidissement et de l'électronique de puissance au coût global.

Coûts d'investissement

- Coût de l'empilement
- Systèmes de stockage d'hydrogène
- Électronique de puissance
- Installation et infrastructures

Coûts d'exploitation

- Coût du combustible hydrogène
- Coûts de maintenance
- Consommation d'énergie des systèmes de refroidissement et auxiliaires
- Coûts de remplacement du système

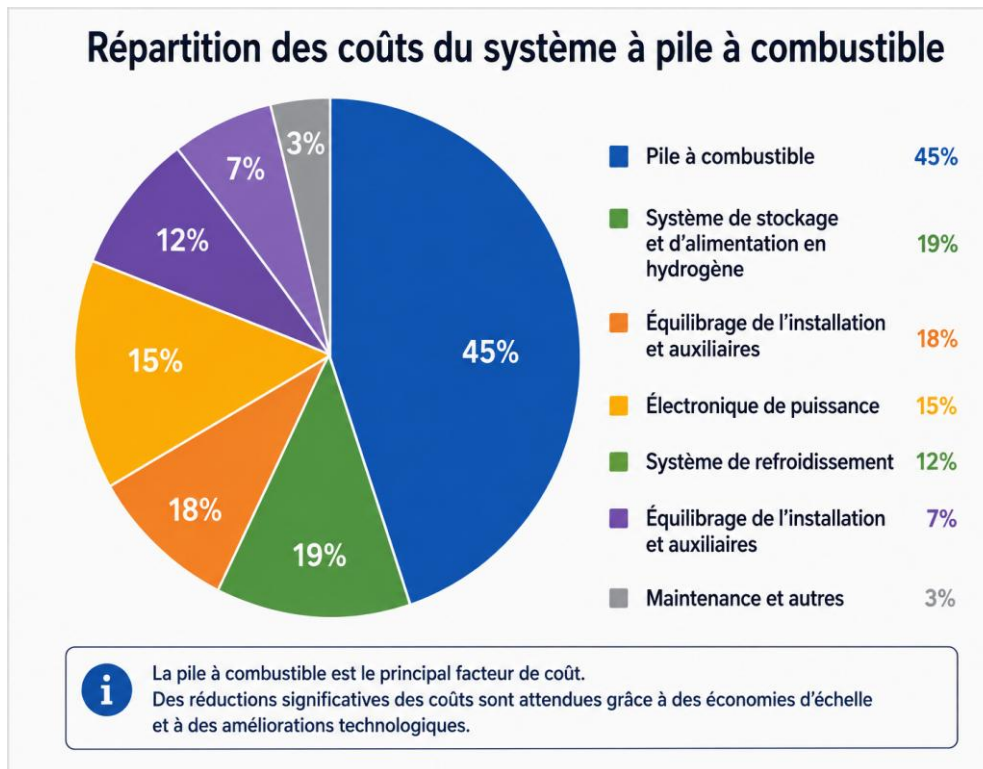


Figure 5.1 - Répartition indicative du coût d'un système à pile à combustible

Difficultés

- Coût élevé des matériaux catalytiques
- Coût des infrastructures hydrogène
- Complexité de fabrication

5.1.2. Analyse de la consommation de combustible

La consommation de combustible influence le rendement opérationnel et les performances économiques. L'expression donnée dans le document source est :

$$\text{Consommation de combustible} = \text{Puissance de sortie} / (\text{rendement du système} \times \text{contenu énergétique du combustible})$$

Facteurs influençant la consommation

- Demande de charge
- Rendement de la pile à combustible
- Température de fonctionnement
- Pureté de l'hydrogène

5.1.3. Analyse du coût sur le cycle de vie

L'analyse du coût sur le cycle de vie évalue le coût total d'un système sur toute sa durée d'exploitation. Les composantes sont :

- Investissement initial
- Dépenses de combustible

- Coûts de maintenance
- Coûts de remplacement
- Coûts de fin de vie et de recyclage

L'analyse du cycle de vie permet :

- de comparer les technologies énergétiques
- d'évaluer un investissement à long terme
- d'améliorer la planification économique

5.1.4. Stratégies de réduction des coûts

Plusieurs approches peuvent réduire le coût des systèmes à pile à combustible :

- Production de masse
- Amélioration des matériaux catalytiques
- Techniques de fabrication avancées
- Amélioration des méthodes de production d'hydrogène
- Amélioration du rendement des systèmes

Avantages

- Accessibilité économique accrue
- Adoption plus large par le marché
- Compétitivité améliorée

5.2. Évaluation environnementale et durabilité

5.2.1. Réduction des émissions de carbone

Les piles à combustible peuvent réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre lorsqu'elles sont alimentées par de l'hydrogène renouvelable.

Avantages

- Réduction des émissions de CO₂
- Diminution de la pollution atmosphérique
- Amélioration de la qualité de l'environnement

Les piles à combustible contribuent aux objectifs d'énergie propre dans les domaines suivants :

- Décarbonation
- Intégration des énergies renouvelables
- Transport durable

5.2.2. Avantages environnementaux des piles à combustible

Les piles à combustible présentent plusieurs avantages environnementaux par rapport aux systèmes fondés sur les combustibles fossiles :

- rendement énergétique élevé
- faibles nuisances sonores
- très faibles émissions polluantes au point d'usage
- réduction de la dépendance aux combustibles fossiles

Sous-produit eau : les piles à combustible à hydrogène produisent principalement de l'eau et de la chaleur pendant leur fonctionnement.

5.3. Notions d'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) évalue les impacts environnementaux depuis la production jusqu'à la fin de vie.

Étapes de l'ACV

1. Extraction des matières premières
2. Fabrication
3. Transport
4. Exploitation
5. Recyclage et élimination

L'ACV est importante parce qu'elle soutient :

- la conception durable
- l'élaboration de politiques environnementales
- des méthodes de production plus propres

5.4. Technologies émergentes de piles à combustible

5.4.1. Piles à combustible haute température

Les piles à combustible haute température fonctionnent à température élevée afin d'améliorer le rendement.

Exemples

- Piles à oxyde solide (SOFC)
- Piles à carbonate fondu (MCFC)

Avantages

- Rendement élevé
- Flexibilité vis-à-vis du combustible
- Possibilité de cogénération

5.4.2. Piles à combustible réversibles

Les piles réversibles peuvent fonctionner à la fois comme pile à combustible et comme électrolyseur. Elles peuvent :

- produire de l'électricité à partir d'hydrogène
- produire de l'hydrogène à partir d'électricité

Applications

- Stockage des énergies renouvelables
- Équilibrage du réseau
- Systèmes de production d'hydrogène

5.4.3. Micro-piles à combustible

Les micro-piles à combustible sont des systèmes compacts destinés aux appareils électroniques portables.

Applications

- Électronique portable
- Dispositifs médicaux
- Capteurs distants

Avantages

- Conception légère
- Longue durée de fonctionnement
- Densité énergétique élevée

5.5. Optimisation des piles à combustible par intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) peut améliorer les performances et la gestion des systèmes à pile à combustible.

Applications de l'IA

- Maintenance prédictive
- Optimisation des performances
- Détection des défauts
- Gestion de l'énergie

Avantages

- Amélioration du rendement
- Réduction des coûts d'exploitation
- Fiabilité accrue

5.6. Applications futures de l'hydrogène et des piles à combustible

La figure 5.2 illustre un écosystème futur hydrogène-piles à combustible comprenant la production renouvelable, la production d'hydrogène, le stockage, le transport, les applications des piles à combustible et l'intégration au réseau intelligent. La figure 5.3 présente les applications dans les transports, le résidentiel, l'industrie et le soutien au réseau.

5.6.1. Systèmes énergétiques intelligents

Les futurs systèmes énergétiques intelligents intègrent les piles à combustible, les énergies renouvelables et les technologies numériques.

Caractéristiques

- Gestion intelligente de l'énergie
- Surveillance en temps réel
- Systèmes de commande automatisés
- Ressources énergétiques distribuées

5.6.2. Microréseaux à hydrogène

Les microréseaux à hydrogène utilisent le stockage d'hydrogène et les piles à combustible pour des systèmes énergétiques locaux.

Avantages

- Alimentation de secours fiable
- Stockage des énergies renouvelables
- Indépendance énergétique

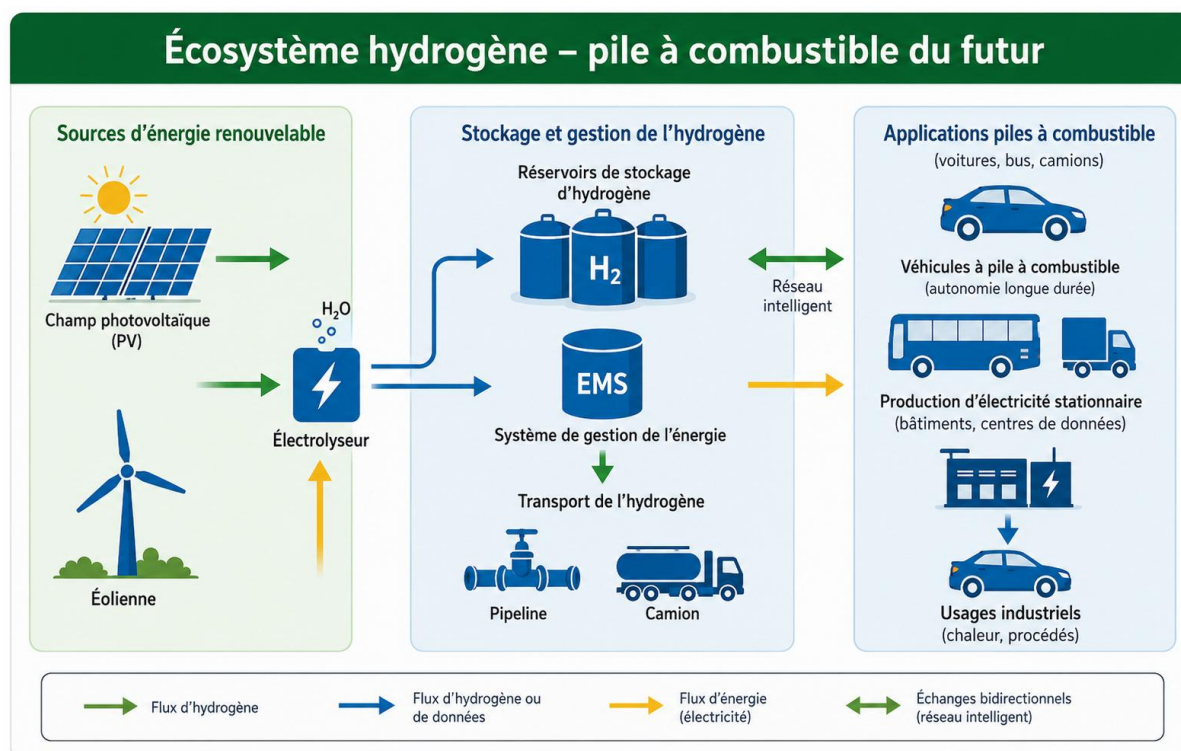


Figure 5.2 - Écosystème futur hydrogène - piles à combustible

Applications

- Électrification rurale
- Parcs industriels
- Campus universitaires

5.6.3. Applications de stockage des énergies renouvelables

L'hydrogène permet le stockage de longue durée de l'énergie renouvelable. Ces applications :

- compensent la variabilité des énergies renouvelables
- soutiennent la stabilité du réseau
- permettent le stockage saisonnier de l'énergie

Processus de stockage : l'électricité renouvelable est convertie en hydrogène par électrolyse, puis reconvertie en électricité à l'aide de piles à combustible.

Décarbonation industrielle : les piles à combustible et les technologies hydrogène soutiennent des opérations industrielles plus propres.

Applications industrielles

- Production d'acier
- Industries chimiques
- Transport lourd
- Production d'électricité

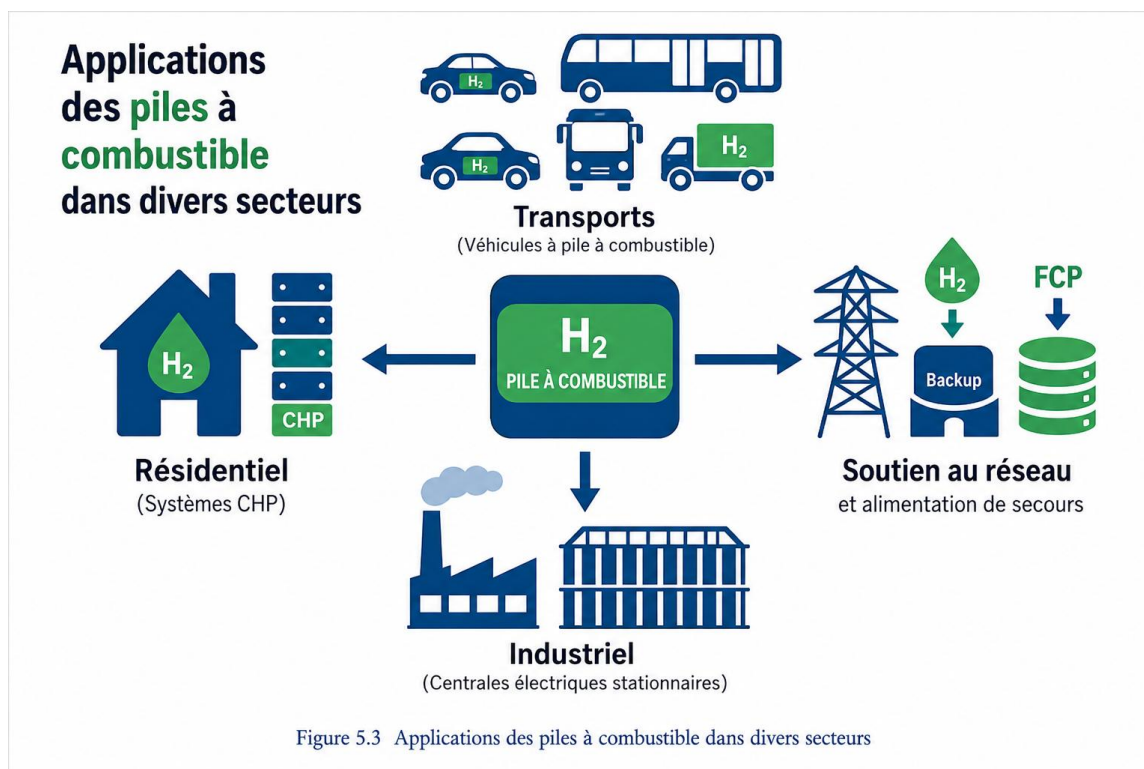


Figure 5.3 - Applications des piles à combustible par secteur

Avantages

- Réduction de l'usage des combustibles fossiles
- Réduction des émissions industrielles
- Procédés de production plus durables

5.7. Économie de l'hydrogène et perspectives de politique publique

5.7.1. Tendances mondiales du marché des piles à combustible

Le marché mondial des piles à combustible continue de se développer sous l'effet de la demande croissante en énergies propres.

Facteurs de croissance

- Développement des énergies renouvelables
- Incitations publiques
- Progrès technologiques
- Électrification des transports

Principaux segments de marché

- Transport
- Production stationnaire
- Systèmes d'alimentation portables

5.7.2. Feuilles de route de la mobilité hydrogène

Les feuilles de route de la mobilité hydrogène orientent le développement des infrastructures de transport utilisant l'hydrogène.

Éléments clés

- Stations de ravitaillement en hydrogène
- Déploiement des véhicules à pile à combustible
- Mécanismes de soutien public
- Stratégies d'investissement

Objectifs

- Réduire les émissions des transports
- Développer les systèmes de mobilité propre

5.7.3. Politiques et possibilités d'investissement

Les politiques publiques influencent fortement le développement de l'économie de l'hydrogène.

Principaux domaines de politique publique

- Incitations en faveur des énergies propres
- Objectifs de réduction des émissions de carbone
- Financement de la recherche et du développement
- Investissement dans les infrastructures

Possibilités d'investissement

- Production d'hydrogène

- Fabrication de piles à combustible
- Intégration des énergies renouvelables
- Infrastructures de transport

Activités pratiques et de laboratoire

1. Assemblage et inspection d'un empilement de piles à combustible
2. Essai de performances d'une pile à combustible
3. Analyse des caractéristiques tension-courant
4. Calcul du rendement d'une pile à combustible
5. Simulation d'un système hybride renouvelable-pile à combustible
6. Essai d'un système de commande de pile à combustible
7. Exercice de sécurité hydrogène et de détection de fuite
8. Mini-projet de conception d'un système hybride à pile à combustible

5.8. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les apprenants ont étudié les aspects économiques, environnementaux et technologiques futurs des systèmes à pile à combustible et des applications de l'hydrogène. Le chapitre a expliqué l'analyse des coûts, l'évaluation de la consommation de combustible, le calcul des coûts sur le cycle de vie et les stratégies de réduction des coûts. Les apprenants ont aussi exploré la durabilité environnementale, notamment la réduction des émissions de carbone et les méthodes d'analyse du cycle de vie. Le chapitre a enfin présenté des technologies émergentes, les applications futures de l'hydrogène, la décarbonation industrielle et les tendances de l'économie mondiale de l'hydrogène, ainsi que les politiques et possibilités d'investissement favorisant le développement des énergies propres.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez les principaux coûts associés aux systèmes à pile à combustible.
2. Décrivez l'importance de l'analyse du coût sur le cycle de vie.
3. Présentez les avantages environnementaux des piles à combustible.
4. Expliquez le concept de pile à combustible réversible.
5. Décrivez les applications futures des microréseaux à hydrogène.
6. Discutez du rôle de l'intelligence artificielle dans l'optimisation des piles à combustible.
7. Expliquez l'importance des politiques relatives à l'économie de l'hydrogène.
8. Identifiez les secteurs dans lesquels les technologies de piles à combustible devraient se développer à l'avenir.

Note de contrôle de traduction

Cette traduction française couvre l'intégralité du fichier source H2-A3(1).pdf. Les corrections techniques et structurelles explicitement autorisées par le responsable humain du projet sont consignées dans le journal QA joint. La version reste soumise à l'acceptation humaine finale prévue par le processus PRISTINE-VET.

H2-A4

Installation, exploitation et maintenance des systèmes énergétiques à hydrogène

Description du cours

Ce cours dote les apprenants de compétences pratiques en installation, exploitation, maintenance, diagnostic des défauts, surveillance des performances et dépannage des systèmes énergétiques à hydrogène, conformément aux normes industrielles et aux procédures de sécurité. Il met l'accent sur les compétences pratiques nécessaires à l'exploitation sûre et efficace des systèmes de production, de stockage et de distribution d'hydrogène ainsi que des systèmes à pile à combustible utilisés dans les applications industrielles et d'énergie renouvelable.

Acquis d'apprentissage du cours

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

1. Installer les composants d'un système énergétique à hydrogène conformément aux spécifications techniques et aux normes de sécurité.
2. Exploiter de manière efficace et sûre les systèmes de production et de stockage d'hydrogène ainsi que les systèmes à pile à combustible.
3. Réaliser l'inspection, la maintenance et la surveillance des performances des systèmes énergétiques à hydrogène.
4. Diagnostiquer et dépanner les défauts des systèmes à hydrogène et à pile à combustible en appliquant des procédures normalisées.
5. Appliquer les réglementations de sécurité industrielle et les procédures d'exploitation dans les applications énergétiques à hydrogène.

H2-A4-1 — Installation des systèmes énergétiques à hydrogène

Objectifs d'apprentissage du chapitre 1

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

- Interpréter les plans d'implantation du système et planifier la préparation du site pour les installations à hydrogène.
- Installer les électrolyseurs, réservoirs de stockage, tuyauteries et systèmes à pile à combustible conformément aux spécifications.
- Mettre en œuvre les principales procédures de sécurité, notamment les essais d'étanchéité et l'identification des dangers.
- Veiller au respect des normes applicables pendant l'installation.

1.1. Introduction à l'installation des systèmes énergétiques à hydrogène

Les systèmes énergétiques à hydrogène occupent une place croissante dans les énergies renouvelables, les transports, les applications industrielles et la production d'électricité durable. Leur installation correcte est essentielle pour garantir une exploitation sûre, fiable et efficace. Les activités d'installation comprennent la mise en place des unités de production d'hydrogène, des systèmes de stockage, des systèmes à pile à combustible, des réseaux de tuyauteries, des interfaces électriques et des systèmes de sécurité conformément aux normes industrielles et aux spécifications techniques.

Ce chapitre présente les procédures, les exigences relatives aux équipements, les normes d'installation et les pratiques de sécurité associées à l'installation des systèmes énergétiques à hydrogène. Les apprenants développeront des compétences pratiques pour installer les systèmes de production d'hydrogène, de stockage et de distribution, les systèmes à pile à combustible ainsi que les composants électriques et de contrôle associés.

Les systèmes énergétiques à hydrogène sont des technologies intégrées qui produisent, stockent, distribuent et utilisent l'hydrogène pour la production d'énergie et les applications industrielles.

Principaux sous-systèmes d'un système énergétique à hydrogène :

1. Production — généralement par électrolyse de l'eau (électrolyseurs alcalins ou PEM).
2. Stockage — hydrogène comprimé, liquide ou stockage sur hydrures métalliques.
3. Distribution — tuyauteries, vannes et régulation de pression.
4. Utilisation — piles à combustible (par exemple PEMFC) convertissant l'hydrogène en électricité.

Ces systèmes prennent notamment en charge le stockage d'énergie renouvelable, l'alimentation de secours et les applications industrielles.

Applications des systèmes énergétiques à hydrogène

- Stockage d'énergie renouvelable
- Véhicules électriques à pile à combustible
- Systèmes d'alimentation de secours

- Applications énergétiques industrielles
- Réseaux électriques intelligents

Exigences d'installation et normes

Les systèmes énergétiques à hydrogène doivent être installés conformément aux normes techniques et aux réglementations de sécurité.

Exigences générales d'installation :

- Choix approprié du site
- Ventilation adéquate
- Systèmes de protection incendie
- Mise à la terre électrique sûre
- Tuyauteries résistantes à la pression

Une installation correcte :

- Garantit la sécurité d'exploitation
- Améliore la fiabilité du système
- Réduit les défaillances
- Améliore l'efficacité opérationnelle
- Assure la conformité aux normes industrielles

Normes et réglementations courantes :

- Normes ISO relatives à la sécurité de l'hydrogène
- Normes électriques IEC
- Codes NFPA relatifs à la sécurité de l'hydrogène
- Directives industrielles d'installation

Normes clés citées dans le document source :

- ISO 22734 — Générateurs d'hydrogène utilisant l'électrolyse de l'eau.
- NFPA 2 — Hydrogen Technologies Code (installation et intégration dans les installations).
- ASME B31.12 — Tuyauteries et canalisations d'hydrogène.
- CGA G-5 series — Tuyauteries et systèmes de mise à l'évent d'hydrogène.
- Codes locaux du bâtiment et de l'électricité, et OSHA 1910.103 pour la manipulation de l'hydrogène.

Le respect de ces normes contribue à prévenir les accidents, à assurer la compatibilité des équipements, à améliorer la fiabilité opérationnelle et à protéger les personnes et les biens. Les installations doivent prendre en compte les classes de pression, la compatibilité des matériaux — notamment la résistance à la fragilisation par l'hydrogène —, le classement électrique des zones dangereuses et la ventilation.

Préparation et planification du site

La préparation du site doit être réalisée avant le début des travaux d'installation afin de garantir une exploitation sûre, fiable et efficace. Une planification correcte réduit les risques opérationnels, facilite l'accès aux équipements et favorise le respect des normes de sécurité industrielle.

Activités de préparation du site :

- Inspection de la zone
- Nivellement du sol et préparation des fondations
- Évaluation de la ventilation
- Vérification de la disponibilité de l'alimentation électrique
- Préparation de l'alimentation en eau et du drainage
- Délimitation des zones de sécurité

Évaluation et planification du site :

- Topographie du site et état du sol
- Proximité des sources d'inflammation
- Accessibilité pour le personnel de maintenance et les véhicules
- Conditions environnementales, notamment la direction du vent pour les systèmes de ventilation

Élaboration du plan d'implantation du système :

- Disposition des équipements
- Distances de séparation entre les composants
- Emplacement des événements et des rejets
- Points d'arrêt d'urgence
- Emplacement du stockage d'hydrogène et tracé des tuyauteries

Permis et évaluation des risques :

- Obtenir les permis et autorisations nécessaires
- Réaliser des évaluations des risques de sécurité et d'exploitation, notamment des études HAZOP (Hazard and Operability Study)
- Vérifier la conformité aux codes et normes industriels

Une préparation correcte du site améliore l'efficacité de l'installation, renforce la sécurité d'exploitation, réduit les risques d'accident, facilite les opérations de maintenance futures et assure la conformité réglementaire.

Bonne pratique : respecter les distances minimales de séparation par rapport aux bâtiments, aux voies publiques et aux autres équipements conformément à la NFPA 2.

Autres considérations de planification :

- Conception de l'implantation des équipements
- Accessibilité pour la maintenance
- Itinéraires d'évacuation d'urgence
- Emplacement du stockage d'hydrogène

- Conditions environnementales

Mesures de sécurité sur le site :

- Signalisation des dangers
- Zones d'accès restreint
- Systèmes d'extinction incendie
- Accès aux dispositifs d'arrêt d'urgence

Interprétation des plans d'implantation

Les schémas d'implantation fournissent des informations sur la disposition des équipements et les raccordements entre composants.

Types de dessins et schémas :

- Schémas de tuyauterie et d'instrumentation (P&ID)
- Schémas de câblage électrique
- Plans d'implantation mécanique
- Schémas de flux du système

Informations figurant dans les plans :

- Position des équipements
- Raccordements de tuyauterie
- Interfaces électriques
- Emplacement des systèmes de contrôle
- Implantation des équipements de sécurité

Une interprétation correcte prévient les erreurs d'installation, améliore l'intégration du système, facilite le dépannage et accroît l'efficacité de la maintenance.

1.2. Installation des systèmes de production d'hydrogène

La Figure 1.1 présente un schéma d'installation d'un système énergétique à hydrogène comprenant un électrolyseur, le stockage d'hydrogène, les tuyauteries, un stack de pile à combustible, une unité de contrôle et les raccordements électriques.

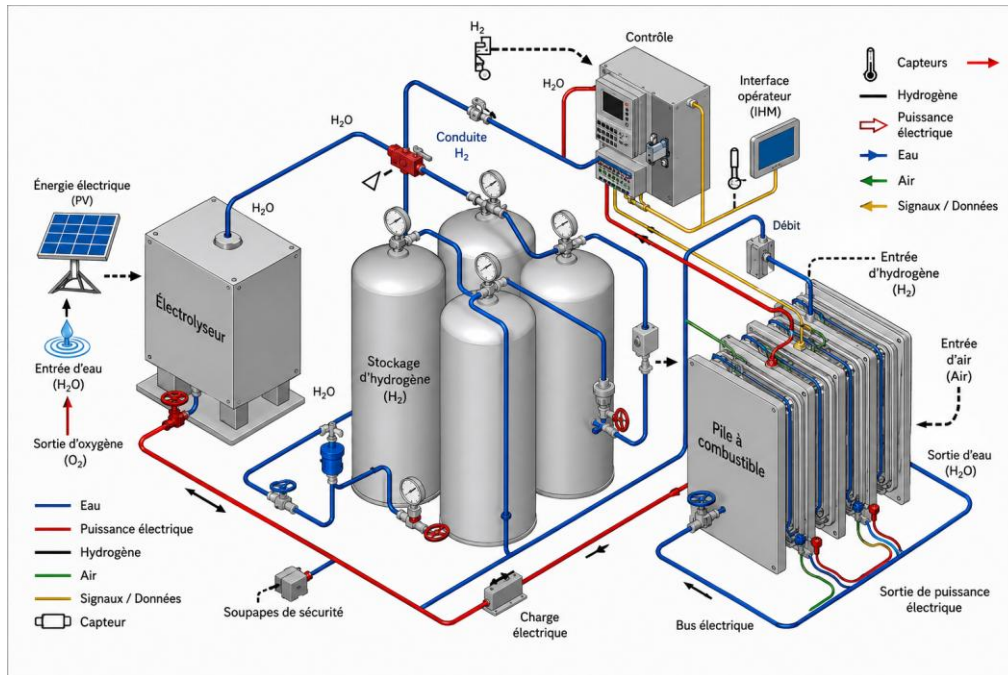


Figure 1.1 — Schéma d'installation d'un système énergétique à hydrogène

1.2.1. Procédures d'installation de l'électrolyseur

Les électrolyseurs produisent de l'hydrogène en dissociant l'eau en hydrogène et oxygène à l'aide d'électricité.

Principaux composants :

- Stack de l'électrolyseur
- Système d'alimentation en eau
- Unité d'alimentation électrique
- Système de séparation des gaz
- Système de refroidissement

Procédure d'installation :

1. Positionner l'électrolyseur sur une fondation stable.
2. Fixer les structures de montage.
3. Raccorder les conduites d'alimentation en eau.
4. Installer les raccords électriques.
5. Raccorder les tuyauteries de sortie des gaz.
6. Vérifier l'alignement et l'étanchéité du système.

Points à prendre en compte :

- Ventilation adéquate
- Exigences relatives à la qualité de l'eau
- Mise à la terre électrique
- Régulation de la température

1.2.2. Raccordements d'alimentation en eau

Les électrolyseurs nécessitent de l'eau purifiée pour produire l'hydrogène.

Composants du circuit d'eau :

- Réservoir d'eau
- Système de purification de l'eau
- Pompes et vannes
- Dispositifs de régulation du débit

Exigences d'installation :

- Tuyauteries étanches
- Régulation correcte de la pression
- Systèmes de filtration de l'eau
- Matériaux résistants à la corrosion

Une mauvaise qualité d'eau peut entraîner une baisse de rendement, endommager l'électrolyseur, contaminer les membranes et augmenter les coûts de maintenance.

1.2.3. Intégration de l'alimentation électrique

Les électrolyseurs nécessitent une alimentation électrique stable.

Composants électriques :

- Convertisseurs de puissance
- Disjoncteurs
- Dispositifs de protection
- Systèmes de mise à la terre

Procédure d'installation :

- Raccorder les câbles de puissance
- Installer les dispositifs de protection
- Vérifier les systèmes de mise à la terre
- Contrôler la tension et le courant d'alimentation

Considérations de sécurité :

- Isolation électrique
- Protection contre les surintensités
- Dimensionnement approprié des câbles
- Procédures de consignation des énergies (lockout/tagout, LOTO)

1.2.4. Exigences de ventilation

Les zones de production d'hydrogène nécessitent une ventilation adéquate afin d'éviter l'accumulation de gaz.

Objectifs de la ventilation :

- Évacuer l'hydrogène issu d'une fuite
- Réduire le risque d'explosion
- Maintenir des conditions de travail sûres

Systèmes de ventilation :

- Ventilation naturelle
- Systèmes d'extraction mécanique
- Ventilateurs d'extraction des gaz

Dispositifs de sécurité :

- Détecteurs d'hydrogène
- Systèmes d'alarme
- Commandes de ventilation d'urgence

1.3. Installation du stockage et de la distribution d'hydrogène

1.3.1. Installation des réservoirs de stockage d'hydrogène

Les réservoirs de stockage permettent de stocker en sécurité l'hydrogène comprimé ou liquéfié. La Figure 1.2 représente un ensemble de stockage avec régulateurs de pression, soupapes de sûreté, raccords de tuyauterie et mise à la terre.

Types de systèmes de stockage :

- Bouteilles de gaz comprimé
- Réservoirs haute pression
- Réservoirs d'hydrogène liquide
- Systèmes de stockage sur hydrures métalliques

Procédure d'installation :

- Préparer une fondation de montage stable
- Fixer les supports des réservoirs
- Installer les dispositifs de décharge de pression
- Raccorder les tuyauteries d'hydrogène
- Vérifier les raccords de mise à la terre

Exigences de sécurité :

- Ventilation appropriée
- Systèmes de surveillance de la pression
- Distances de séparation sûres
- Systèmes de détection des fuites

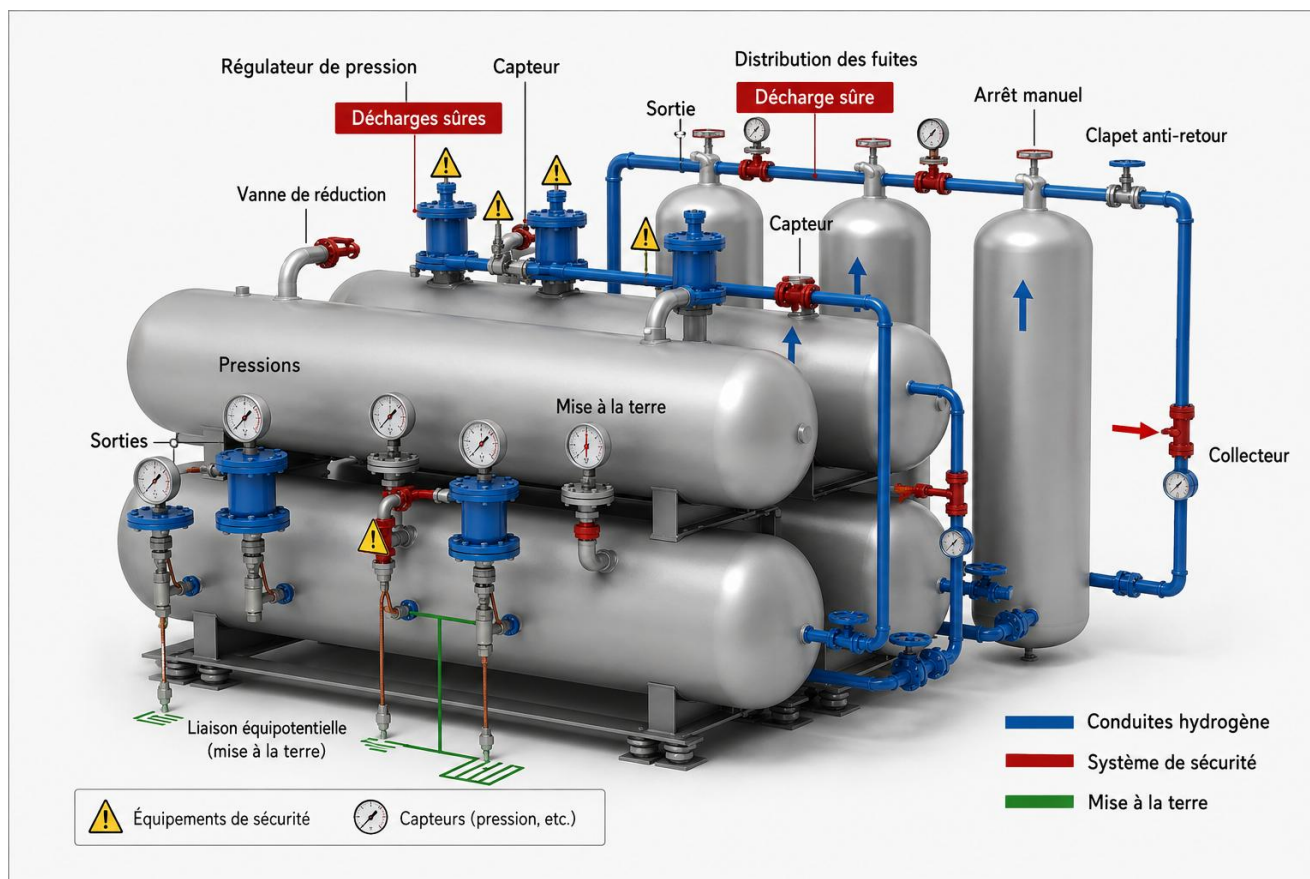


Figure 1.2 — Installation d'un réservoir de stockage d'hydrogène

1.3.2. Systèmes de régulation de pression

Les régulateurs de pression contrôlent la pression d'hydrogène fournie au système.

Principaux composants :

- Régulateurs de pression
- Manomètres
- Soupapes de sûreté
- Régulateurs de débit

Fonctions principales :

- Maintenir une pression stable
- Prévenir les surpressions
- Protéger les composants du système

Considérations d'installation :

- Classe de pression appropriée
- Raccords étanches
- Étalonnage correct

1.3.3. Tuyauteries et raccords d'hydrogène

Les tuyauteries d'hydrogène transportent le gaz entre les différents composants du système.

Matériaux de tuyauterie cités dans le document source :

- Acier inoxydable
- Alliages de cuivre
- Polymères compatibles avec l'hydrogène

Procédures d'installation :

- Cheminement et supportage des tuyauteries
- Étanchéité des assemblages
- Installation des vannes
- Essais de pression

Considérations de sécurité :

- Prévention des fuites
- Résistance à la corrosion
- Résistance à la pression
- Étiquetage approprié

1.3.4. Techniques de prévention des fuites

La prévention des fuites d'hydrogène est essentielle en raison de la forte inflammabilité de ce gaz.

Méthodes de prévention :

- Techniques d'étanchéité appropriées
- Utilisation de matériaux compatibles
- Procédures d'essai de pression
- Inspections régulières

Méthodes de détection :

- Essai à la solution savonneuse
- Détecteurs électroniques d'hydrogène
- Surveillance de la pression

La prévention des fuites réduit le risque d'incendie, améliore la sécurité d'exploitation et limite les pertes d'hydrogène.

1.4. Installation d'un système à pile à combustible

La Figure 1.3 présente l'agencement d'installation d'une pile à combustible : positionnement du stack, circuit de refroidissement, alimentation en air, bornes de sortie électrique et connexions de l'interface de contrôle.

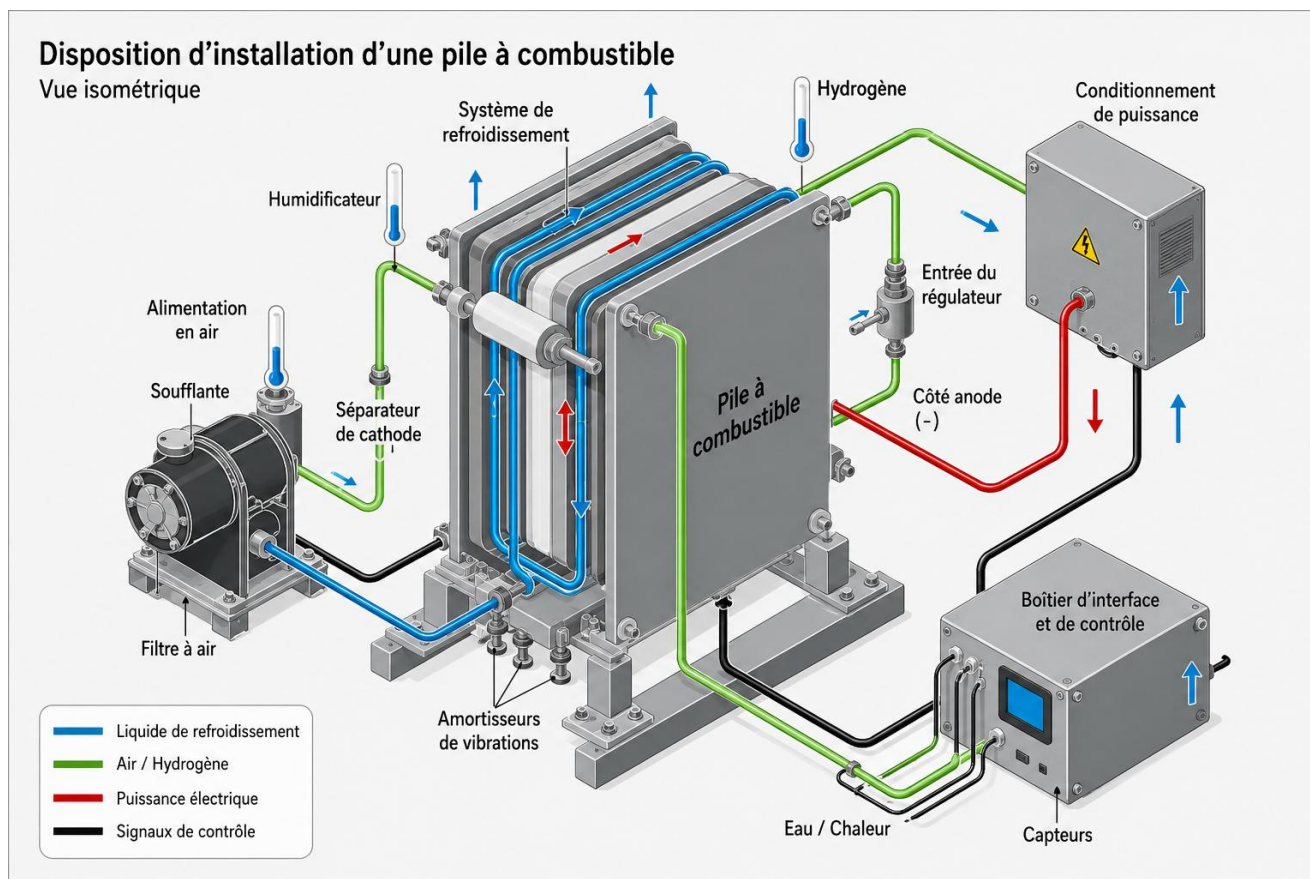


Figure 1.3 — Agencement d'installation d'un système à pile à combustible

1.4.1. Installation du stack de pile à combustible

Les stacks de piles à combustible convertissent l'hydrogène en énergie électrique.

Procédure d'installation :

- Positionner correctement le stack
- Fixer le système de montage
- Raccorder les conduites d'alimentation en combustible
- Installer les bornes électriques
- Vérifier l'intégrité de l'étanchéité

Exigences d'installation :

- Ventilation appropriée
- Régulation de la température
- Protection contre les vibrations
- Isolation électrique

1.4.2. Raccordement du système de refroidissement

Les systèmes de refroidissement régulent la température de fonctionnement de la pile à combustible.

Composants de refroidissement :

- Pompes

- Échangeurs de chaleur
- Tuyauteries de refroidissement
- Radiateurs

Procédure d'installation :

- Raccorder les conduites de fluide caloporteur
- Installer les pompes de refroidissement
- Vérifier le débit du fluide
- Tester le fonctionnement de l'échangeur de chaleur

Un refroidissement correct prévient la surchauffe, améliore le rendement et prolonge la durée de vie de la pile à combustible.

1.4.3. Mise en place du système d'alimentation en air

Les piles à combustible nécessitent de l'oxygène, fourni par un système d'admission d'air.

Principaux composants :

- Compresseurs d'air
- Filtres à air
- Humidificateurs
- Conduits d'air

Procédure d'installation :

- Installer les conduites d'alimentation en air
- Raccorder les compresseurs
- Installer les filtres et les humidificateurs
- Vérifier le fonctionnement du débit d'air

Exigences :

- Alimentation en air propre
- Débit d'air stable
- Maîtrise de l'humidité

1.4.4. Installation de l'interface électrique

Les systèmes à pile à combustible doivent être raccordés aux charges électriques et aux systèmes de contrôle.

Composants électriques :

- Bornes de sortie en courant continu
- Onduleurs
- Convertisseurs de puissance
- Panneaux de commande

Procédure d'installation :

- Raccorder les câbles électriques
- Installer les systèmes de mise à la terre
- Vérifier la polarité électrique
- Tester les raccordements de sortie de puissance

Considérations de sécurité :

- Isolement électrique
- Protection contre les chocs électriques
- Dispositifs de protection des circuits

1.5. Procédures de sécurité lors de l'installation

1.5.1. Équipements de protection individuelle (EPI)

Les EPI protègent le personnel pendant les activités d'installation.

- Casque de sécurité
- Gants de protection
- Lunettes de sécurité
- Vêtements ignifuges
- Chaussures de sécurité

Les EPI réduisent le risque de blessure, l'exposition aux matières dangereuses et les risques électriques.

1.5.2. Identification des dangers pendant l'installation

L'identification des dangers permet de prévenir les accidents pendant l'installation.

- Fuite d'hydrogène
- Choc électrique
- Rejet de gaz à haute pression
- Risques d'incendie
- Blessures mécaniques

Mesures de maîtrise des risques :

- Évaluation des risques
- Inspections de sécurité
- Signalisation d'avertissement
- Procédures d'isolement

1.5.3. Procédures d'essai d'étanchéité à l'hydrogène

Les essais d'étanchéité vérifient la sécurité du système avant sa mise en service.

Méthodes :

- Essais de pression

- Essai à la solution savonneuse
- Détection électronique des gaz
- Détection ultrasonore des fuites

Procédure :

1. Mettre le système sous pression.
2. Inspecter les joints et les raccords.
3. Surveiller la stabilité de la pression.
4. Vérifier les indications des détecteurs.

Les essais d'étanchéité préviennent les risques d'incendie, améliorent la sécurité d'exploitation et confirment l'intégrité du système.

1.5.4. Conformité aux normes de sécurité industrielle

Les installations à hydrogène doivent respecter les réglementations de sécurité approuvées.

Organismes de normalisation et de réglementation cités :

- ISO
- IEC
- NFPA
- OSHA

Domaines couverts :

- Manipulation de l'hydrogène
- Installation électrique
- Sécurité des appareils à pression
- Systèmes de protection incendie

Bénéfices de la conformité :

- Exploitation sûre
- Conformité juridique
- Réduction du risque d'accident
- Amélioration de la fiabilité du système

1.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les procédures d'installation et les pratiques de sécurité associées aux systèmes énergétiques à hydrogène. Il a traité de la préparation du site, de l'interprétation des plans, de l'installation des électrolyseurs, de la mise en place du stockage d'hydrogène, de l'installation des tuyauteries, de l'intégration des systèmes à pile à combustible et des interfaces électriques. Les apprenants ont également étudié les procédures de sécurité d'installation, notamment les EPI, l'identification des dangers, les essais d'étanchéité à l'hydrogène et la conformité aux normes de sécurité industrielle nécessaires à une installation sûre et fiable.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquer l'importance d'une installation correcte des systèmes énergétiques à hydrogène.
2. Décrire les principaux composants d'un système de production d'hydrogène.
3. Présenter les exigences d'installation des systèmes de stockage d'hydrogène.
4. Expliquer le rôle des systèmes de régulation de pression.
5. Décrire la procédure d'installation des stacks de piles à combustible.
6. Expliquer l'importance de la ventilation dans les systèmes à hydrogène.
7. Identifier les dangers courants lors de l'installation d'un système à hydrogène.
8. Expliquer l'importance des normes de sécurité industrielle pour l'installation des systèmes énergétiques à hydrogène.

H2-A4-2 — Exploitation des systèmes énergétiques à hydrogène

2.1. Exploitation du système de production d'hydrogène

Une exploitation efficace et sûre des systèmes énergétiques à hydrogène est indispensable à une production, un stockage et une utilisation fiables de l'énergie. Ces systèmes comportent plusieurs composants interconnectés — électrolyseurs, unités de stockage d'hydrogène, piles à combustible, batteries, capteurs et systèmes de contrôle — qui doivent fonctionner de manière coordonnée. Des procédures d'exploitation appropriées permettent de maintenir le rendement du système, de protéger les équipements et d'assurer la sécurité du personnel.

Ce chapitre présente les principes et les procédures d'exploitation des systèmes énergétiques à hydrogène : fonctionnement des systèmes de production, gestion du stockage et de l'alimentation en hydrogène, exploitation des piles à combustible, surveillance et contrôle du système, et fonctionnement des systèmes hybrides renouvelables à hydrogène.

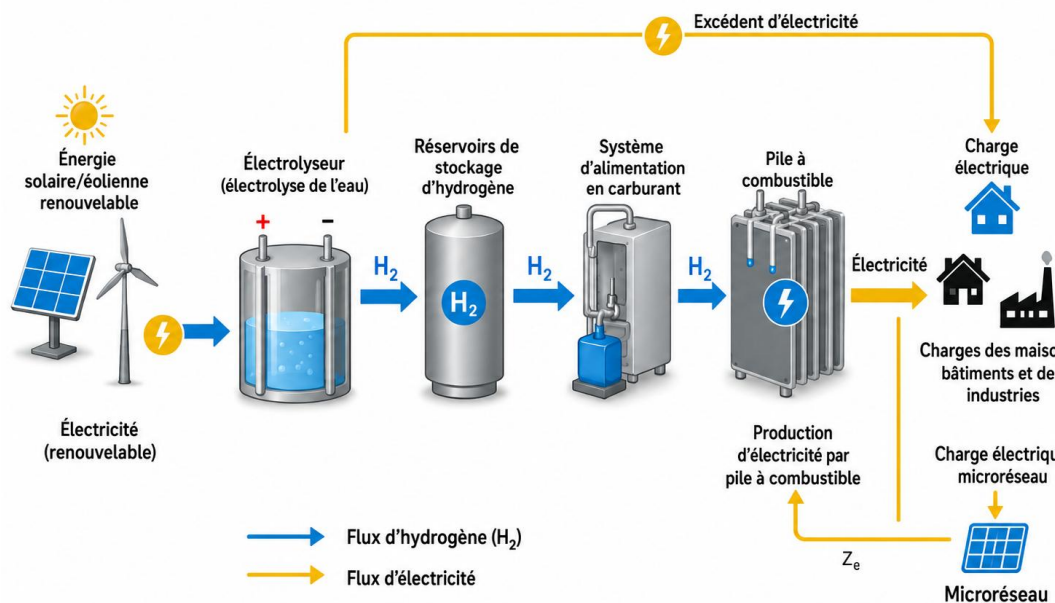


Figure 2.1 — Flux opérationnel d'un système énergétique à hydrogène

2.1.1. Fonctionnement du système d'électrolyse

Les systèmes d'électrolyse produisent de l'hydrogène en séparant l'eau en hydrogène et oxygène au moyen d'énergie électrique.

Principaux composants :

- Stack de l'électrolyseur
- Système d'alimentation en eau
- Unité d'alimentation électrique

- Séparateur de gaz
- Système de refroidissement

Réaction d'électrolyse :



Procédure d'exploitation :

1. Vérifier le niveau et la qualité de l'eau.
2. Démarrer les systèmes de refroidissement et de ventilation.
3. Appliquer l'alimentation électrique à l'électrolyseur.
4. Surveiller les débits de production des gaz.
5. Contrôler la température et la pression de fonctionnement.

Une exploitation correcte améliore l'efficacité de production d'hydrogène, prévient les dommages matériels, garantit la pureté du gaz et renforce la sécurité d'exploitation.

2.1.2. Contrôle de la production d'hydrogène

Le contrôle de la production d'hydrogène adapte la génération de gaz à la demande du système.

Paramètres de contrôle :

- Courant d'alimentation
- Niveau de tension
- Débit d'eau
- Température
- Pression

Objectifs :

- Maintenir une production d'hydrogène stable
- Améliorer l'efficacité énergétique
- Prévenir la surchauffe
- Assurer une exploitation sûre

Méthodes de contrôle :

- Systèmes de contrôle automatiques
- Automates programmables industriels (API/PLC)
- Systèmes de surveillance intelligents

2.1.3. Exigences relatives à la qualité de l'eau

La qualité de l'eau influence directement les performances et la durabilité de l'électrolyseur.

Critères de qualité cités :

- Faible teneur en minéraux

- Faible conductivité électrique
- Absence de contaminants
- pH approprié

Systèmes de traitement de l'eau :

- Unités de déionisation
- Systèmes d'osmose inverse
- Systèmes de filtration

Une mauvaise qualité d'eau peut réduire la production d'hydrogène, contaminer les membranes, provoquer de la corrosion et augmenter les besoins de maintenance.

2.1.4. Surveillance de la pureté du gaz

La pureté de l'hydrogène est importante pour les performances des piles à combustible et pour la sécurité.

Objectifs de surveillance :

- Garantir une qualité élevée de l'hydrogène
- Détecter les contaminations
- Prévenir les dommages aux piles à combustible

Impuretés courantes citées :

- Oxygène
- Vapeur d'eau
- Dioxyde de carbone
- Particules de poussière

Équipements de surveillance :

- Analyseurs de gaz
- Capteurs d'humidité
- Capteurs de pression
- Débitmètres

2.2. Exploitation du stockage et de l'alimentation en hydrogène

2.2.1. Procédures de remplissage en hydrogène

Le remplissage en hydrogène consiste à remplir les réservoirs de stockage avec de l'hydrogène gazeux.

1. Inspecter l'état du réservoir de stockage.
2. Vérifier les classes de pression.
3. Raccorder solidement les conduites de remplissage.
4. Ouvrir progressivement les vannes.
5. Surveiller la pression et la température.

Considérations de sécurité :

- Éviter les conditions de surpression
- Prévenir les fuites de gaz
- Assurer une ventilation appropriée
- Utiliser des équipements de remplissage approuvés

2.2.2. Gestion de la pression

Les systèmes à hydrogène nécessitent une pression de fonctionnement maîtrisée pour une exploitation sûre et efficace.

Composants :

- Régulateurs de pression
- Soupapes de décharge
- Capteurs de pression
- Régulateurs de débit

Objectifs :

- Stabiliser l'alimentation en hydrogène
- Prévenir les dommages matériels
- Améliorer les performances de la pile à combustible

Mesures de sécurité :

- Systèmes d'arrêt automatique
- Alarmes de pression
- Systèmes de mise à l'évent d'urgence

2.2.3. Régulation du débit d'hydrogène

La régulation du débit contrôle la quantité d'hydrogène fournie aux piles à combustible ou aux systèmes de stockage.

Fonctions :

- Maintenir une alimentation en gaz stable
- Adapter le débit à la demande en combustible
- Améliorer l'efficacité du système

Dispositifs de régulation :

- Vannes de régulation
- Régulateurs de débit massique
- Capteurs de débit

Une régulation correcte du débit évite le manque de combustible, améliore l'utilisation de l'hydrogène et protège les composants.

2.2.4. Techniques sûres de manipulation des gaz

La manipulation de l'hydrogène exige des procédures strictes de sécurité d'exploitation.

Pratiques sûres :

- Utiliser des équipements approuvés
- Éviter les flammes nues et les étincelles
- Assurer une mise à la terre correcte
- Réaliser régulièrement des inspections de fuite

Caractéristiques de sécurité de l'hydrogène :

- Très inflammable
- Incolore et inodore
- Faible énergie d'inflammation
- Diffusion rapide du gaz

Précautions d'urgence :

- Systèmes d'arrêt d'urgence
- Alarmes de fuite de gaz
- Systèmes de ventilation
- Équipements de lutte contre l'incendie

2.3. Exploitation des systèmes à pile à combustible

2.3.1. Procédures de démarrage

Les procédures de démarrage préparent le système à pile à combustible à une exploitation sûre. La Figure 2.2 présente un système de contrôle opérationnel avec capteurs, contrôleurs, unités d'affichage, alarmes de sécurité et boucles de contrôle.

1. Inspecter le système d'alimentation en combustible.
2. Activer les systèmes de refroidissement et d'alimentation en air.
3. Démarrer les systèmes de contrôle et de surveillance.
4. Introduire progressivement l'hydrogène.
5. Connecter la charge électrique.

Paramètres à surveiller au démarrage :

- Température du stack
- Pression d'hydrogène
- Débit d'air
- Tension de sortie

Un démarrage contrôlé limite les contraintes thermiques, protège les membranes et améliore la durée de vie du système.

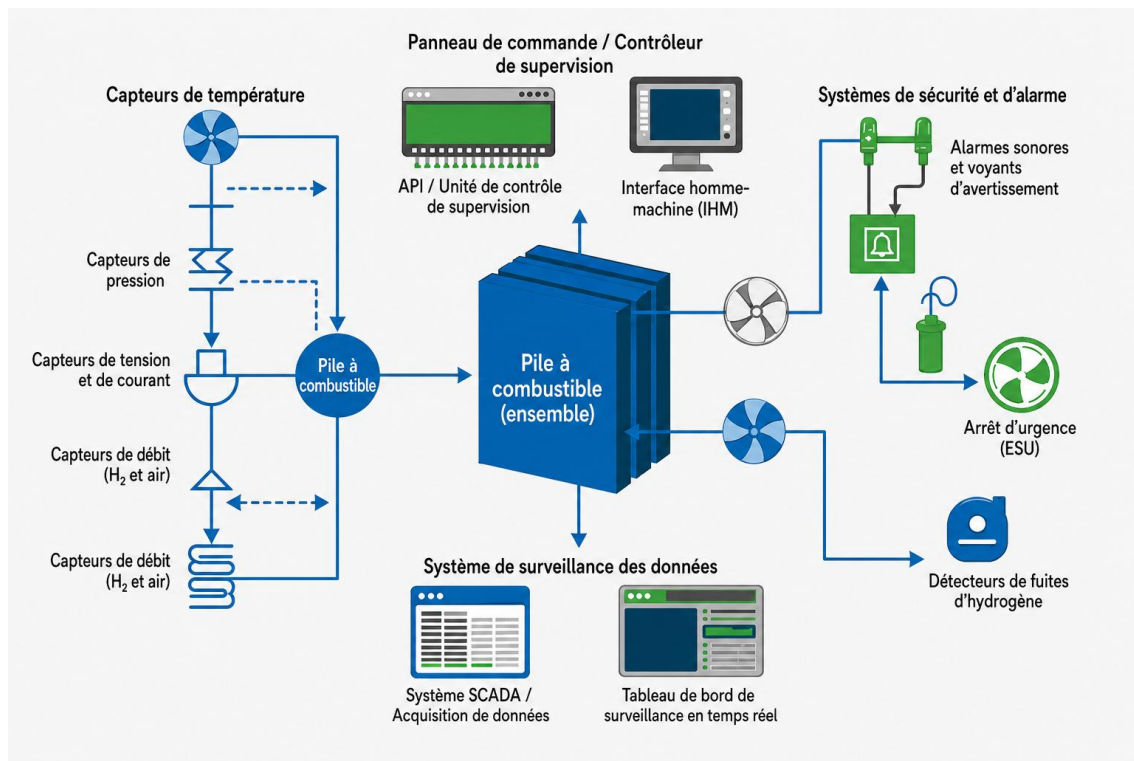


Figure 2.2 — Système de contrôle opérationnel d'une pile à combustible

2.3.2. Gestion de la charge

La gestion de la charge adapte la puissance fournie à la demande énergétique.

Objectifs :

- Équilibrer la production et la consommation de puissance
- Prévenir les surcharges
- Améliorer le rendement

Méthodes :

- Priorisation des charges
- Systèmes d'appui par batterie
- Contrôleurs de puissance intelligents

Bénéfices :

- Alimentation électrique stable
- Réduction de la consommation de combustible
- Amélioration de la fiabilité opérationnelle

2.3.3. Procédures d'arrêt

Les procédures d'arrêt permettent de mettre fin au fonctionnement de la pile à combustible en toute sécurité.

1. Déconnecter la charge électrique.
2. Réduire puis arrêter progressivement l'alimentation en hydrogène.
3. Maintenir le fonctionnement du système de refroidissement pendant la phase nécessaire.

4. Arrêter les systèmes auxiliaires.

5. Isoler les connexions de combustible et les connexions électriques.

Un arrêt correct prévient les dommages aux composants, réduit les risques de sécurité et améliore la durabilité du système.

2.3.4. Paramètres de fonctionnement de la pile à combustible

Les paramètres opérationnels déterminent les performances et le rendement de la pile à combustible.

- Tension du stack
- Courant de sortie
- Température de fonctionnement
- Pression d'hydrogène
- Taux d'utilisation de l'hydrogène

La surveillance de ces paramètres permet d'optimiser les performances, de détecter précocement les défauts et d'améliorer le rendement.

2.4. Surveillance et contrôle du système

2.4.1. Surveillance de la température et de la pression

La température et la pression doivent rester dans les limites de fonctionnement sûres.

Objectifs :

- Prévenir la surchauffe
- Détecter les anomalies de pression
- Maintenir un fonctionnement stable

Dispositifs de surveillance :

- Capteurs de température
- Transducteurs de pression
- Afficheurs numériques
- Systèmes d'acquisition de données

Une surveillance insuffisante peut provoquer une instabilité du système, une baisse de rendement et des dommages matériels.

2.4.2. Fonctionnement et étalonnage des capteurs

Les capteurs fournissent les données nécessaires aux systèmes de surveillance et de contrôle.

Capteurs courants :

- Capteurs de température
- Capteurs de pression
- Détecteurs de fuite d'hydrogène

- Capteurs de débit

Procédures d'étalonnage :

- Comparer les mesures du capteur avec des références étalons
- Ajuster la sortie du capteur
- Vérifier régulièrement l'exactitude

Un étalonnage correct améliore l'exactitude des mesures, renforce la fiabilité du système et prévient les erreurs d'exploitation.

2.4.3. Fonctions du panneau de commande

Les panneaux de commande permettent aux opérateurs de piloter les systèmes énergétiques à hydrogène.

Fonctions :

- Démarrage et arrêt du système
- Réglage des paramètres
- Surveillance des alarmes
- Affichage des données

Composants :

- Écrans d'affichage
- Commutateurs de commande
- Boutons d'arrêt d'urgence
- Voyants lumineux

2.4.4. Systèmes d'alarme et d'avertissement

Les systèmes d'alarme avertissent les opérateurs en cas de conditions anormales.

Situations d'alarme courantes :

- Fuite d'hydrogène
- Température élevée
- Déséquilibre de pression
- Défauts électriques

Fonctions des alarmes :

- Avertissements sonores
- Indications visuelles
- Activation automatique de l'arrêt

Les systèmes d'alarme améliorent la sécurité, préviennent les accidents et protègent les équipements.

2.5. Exploitation des systèmes hybrides à hydrogène

2.5.1. Intégration des énergies renouvelables

Les systèmes hybrides associent les technologies de l'hydrogène à des sources d'énergie renouvelable.

Sources citées :

- Systèmes solaires photovoltaïques
- Éoliennes
- Systèmes hydroélectriques

Bénéfices de l'intégration :

- Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles
- Amélioration de la durabilité énergétique
- Renforcement de la fiabilité énergétique

2.5.2. Coordination batterie–pile à combustible

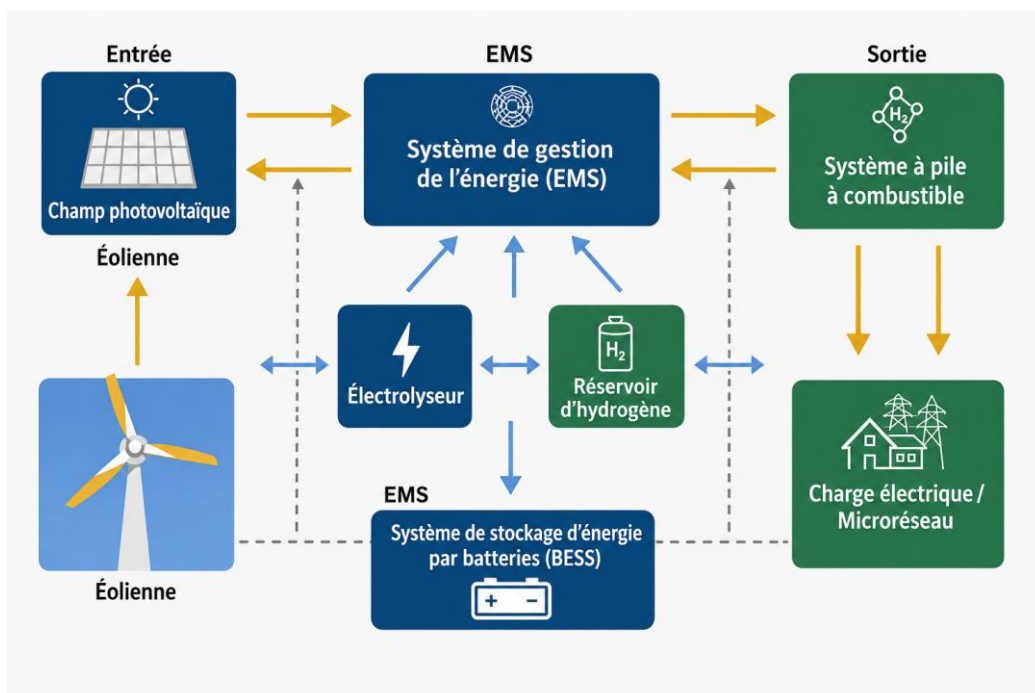
Les batteries et les piles à combustible fonctionnent conjointement afin de stabiliser l'alimentation électrique.

Rôle des batteries :

- Fournir les pointes de puissance de courte durée
- Stocker l'excédent d'énergie renouvelable
- Améliorer la réponse transitoire

Objectifs de coordination :

- Améliorer l'efficacité du système
- Équilibrer les flux d'énergie
- Réduire les contraintes sur la pile à combustible



2.5.3. Techniques d'équilibrage énergétique

L'équilibrage énergétique adapte la production électrique à la demande de la charge.

- Gestion intelligente de l'énergie
- Commande de charge et de décharge de la batterie
- Planification des charges
- Prévion de la production renouvelable

Bénéfices :

- Amélioration de la stabilité du système
- Réduction des pertes d'énergie
- Meilleure qualité de l'alimentation électrique

2.5.4. Fonctionnement raccordé au réseau

Les systèmes raccordés au réseau échangent de l'électricité avec le réseau public.

Modes de fonctionnement :

- Mode de soutien au réseau
- Mode alimentation de secours
- Mode exportation de puissance

Avantages :

- Flexibilité accrue du système
- Fiabilité électrique améliorée
- Soutien à l'intégration des énergies renouvelables

Exigences de sécurité :

- Synchronisation avec le réseau
- Relais de protection
- Protection anti-îlotage

2.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les principes et procédures d'exploitation des systèmes énergétiques à hydrogène, notamment la production, le stockage, la régulation de l'alimentation et l'exploitation des piles à combustible. Il a traité du fonctionnement des électrolyseurs, des procédures de remplissage en hydrogène, de la gestion de la pression et du débit, des phases de démarrage et d'arrêt et des paramètres de fonctionnement des piles à combustible. Les apprenants ont également étudié les techniques de surveillance et de contrôle reposant sur les capteurs, les panneaux de commande, les alarmes et l'étalonnage. Enfin, le chapitre a introduit l'exploitation des systèmes hybrides à hydrogène, l'intégration des énergies renouvelables, la coordination batterie-pile à combustible, l'équilibrage énergétique et le fonctionnement raccordé au réseau.

Questions de révision

1. Expliquer le principe de fonctionnement d'un système d'électrolyse.
2. Décrire l'importance de la qualité de l'eau dans les systèmes de production d'hydrogène.
3. Présenter les procédures sûres de remplissage en hydrogène.
4. Expliquer le rôle de la régulation du débit d'hydrogène.
5. Décrire les procédures de démarrage et d'arrêt des systèmes à pile à combustible.
6. Expliquer l'importance de l'étalonnage des capteurs dans les systèmes à hydrogène.
7. Présenter le rôle des systèmes d'alarme dans la sécurité d'exploitation.
8. Expliquer le fonctionnement des systèmes hybrides à hydrogène intégrés à des sources d'énergie renouvelable.

H2-A4-3 — Maintenance et surveillance des performances des systèmes énergétiques à hydrogène

Une maintenance et une surveillance des performances appropriées sont essentielles pour garantir la fiabilité, l'efficacité et la sécurité des systèmes énergétiques à hydrogène. Les inspections régulières et la maintenance préventive réduisent les défaillances, prolongent la durée de vie des équipements et maintiennent des performances d'exploitation stables. Les techniques de surveillance permettent d'évaluer le rendement, de détecter précocement les anomalies et d'améliorer la gestion opérationnelle.

Ce chapitre présente les pratiques de maintenance préventive, les procédures de maintenance des piles à combustible, l'entretien des systèmes de stockage d'hydrogène, les méthodes de surveillance des performances et les normes de sécurité applicables à la maintenance.

3.1. Techniques de maintenance préventive

3.1.1. Procédures de maintenance planifiée

La maintenance planifiée consiste à réaliser des opérations à des intervalles définis afin de prévenir les défaillances imprévues.

Objectifs :

- Améliorer la fiabilité du système
- Prévenir les pannes
- Maintenir l'efficacité opérationnelle
- Prolonger la durée de vie des équipements

Activités courantes :

- Inspection des équipements
- Nettoyage
- Lubrification
- Étalonnage des instruments
- Remplacement des composants usés

Les calendriers de maintenance peuvent être journaliers, hebdomadaires, mensuels ou annuels. Une maintenance planifiée correcte réduit les temps d'arrêt, améliore la sécurité et limite les coûts de réparation.

3.1.2. Méthodes de nettoyage et d'inspection

Le nettoyage et l'inspection réguliers contribuent au bon fonctionnement du système.

Nettoyage :

- Retirer les poussières et débris
- Nettoyer les systèmes de refroidissement
- Nettoyer les filtres et conduits de ventilation

- Retirer les dépôts de corrosion

Inspection :

- Inspection visuelle
- Recherche de fuites
- Inspection des connexions électriques
- Contrôle de la pression et de la température

Outils d'inspection :

- Lampes d'inspection
- Caméras thermiques
- Détecteurs de fuite
- Manomètres et jauges d'inspection

Le nettoyage et l'inspection améliorent l'efficacité, préviennent la contamination et permettent une détection précoce des défauts.

3.1.3. Lubrification et entretien des composants

Les composants mécaniques doivent être lubrifiés afin de réduire le frottement et l'usure.

Composants concernés :

- Pompes
- Compresseurs
- Ventilateurs
- Roulements

Procédures de lubrification :

- Utiliser les lubrifiants approuvés
- Appliquer la quantité correcte de lubrifiant
- Respecter les calendriers de maintenance

L'entretien des composants peut comprendre le resserrage des raccords, le remplacement des joints, le réglage des pièces mobiles et les essais de fonctionnement du système.

3.1.4. Documentation de maintenance

Les dossiers de maintenance fournissent des informations importantes sur l'état du système et son historique de maintenance.

Types de documents :

- Journaux de maintenance
- Rapports d'inspection
- Rapports de défaut
- Enregistrements d'étalonnage

La documentation permet de suivre les activités, facilite le dépannage, soutient la conformité en matière de sécurité et permet de surveiller l'état des équipements.

3.2. Procédures de maintenance des piles à combustible

3.2.1. Inspection du stack de pile à combustible

Les stacks de piles à combustible doivent être inspectés régulièrement pour maintenir un fonctionnement correct.

Points d'inspection :

- Performance en tension du stack
- Fuites de gaz
- Connexions électriques
- Dommages physiques

Procédure :

1. Arrêter le système en toute sécurité.
2. Inspecter les surfaces et connexions du stack.
3. Mesurer la distribution des tensions.
4. Rechercher des conditions de température anormales.

Une inspection régulière détecte la dégradation des performances, prévient les défaillances et améliore la fiabilité opérationnelle.

3.2.2. Évaluation de l'état de la membrane

Les membranes de pile à combustible sont essentielles au transfert des protons et au rendement du système.

Indicateurs à examiner :

- Dessèchement
- Fissuration
- Gonflement
- Contamination

Méthodes d'évaluation :

- Inspection visuelle
- Essai des performances en tension
- Essai de crossover des gaz

Les dommages à la membrane peuvent provoquer une baisse de rendement, des fuites de gaz, une instabilité de tension et une défaillance de la pile à combustible.

3.2.3. Maintenance du système de refroidissement

Les systèmes de refroidissement régulent la température de fonctionnement de la pile à combustible.

Composants :

- Pompes
- Échangeurs de chaleur
- Tuyauteries de fluide de refroidissement
- Ventilateurs de refroidissement

Activités de maintenance :

- Contrôle du niveau de fluide
- Essai du fonctionnement des pompes
- Nettoyage des échangeurs de chaleur
- Recherche de fuites

Une maintenance correcte du refroidissement prévient la surchauffe, améliore le rendement et prolonge la durée de vie de la pile à combustible.

3.2.4. Remplacement des filtres à air

Les filtres à air empêchent les contaminants de pénétrer dans les systèmes à pile à combustible.

Fonctions :

- Éliminer les particules de poussière
- Améliorer la qualité de l'air
- Protéger les composants de la pile à combustible

Procédure de remplacement :

1. Arrêter le système d'alimentation en air.
2. Retirer le filtre usagé.
3. Installer un filtre neuf approuvé.
4. Vérifier le débit d'air.

Un remplacement régulier maintient la qualité de l'air, améliore les performances et réduit la contamination.

3.3. Maintenance des systèmes de stockage d'hydrogène

3.3.1. Inspection des réservoirs de stockage

Les réservoirs de stockage d'hydrogène doivent être inspectés régulièrement afin de garantir une exploitation sûre.

Points d'inspection :

- État de surface du réservoir
- Signes de corrosion
- Intégrité vis-à-vis de la pression
- Stabilité du système de montage

Méthodes d'inspection :

- Inspection visuelle
- Essais de pression
- Contrôles ultrasonores
- Recherche de fuites

L'inspection des réservoirs prévient les accidents, améliore la sécurité d'exploitation et contribue à la fiabilité du stockage.

3.3.2. Maintenance des systèmes de pression

Les systèmes de pression régulent le débit d'hydrogène et les conditions de stockage.

Composants :

- Régulateurs de pression
- Soupapes de décharge
- Manomètres
- Dispositifs de régulation de débit

Activités de maintenance :

- Étalonnage
- Recherche de fuites
- Essai des vannes
- Réglage de la pression

Une maintenance correcte prévient les surpressions, stabilise le débit d'hydrogène et protège les composants.

3.3.3. Entretien des vannes et régulateurs

Les vannes et les régulateurs contrôlent le débit et la pression d'hydrogène.

Procédures :

- Nettoyer les surfaces des vannes
- Inspecter les joints et raccords
- Tester la réponse en pression
- Remplacer les composants endommagés

Problèmes courants :

- Fuite
- Corrosion
- Obstruction
- Instabilité de pression

Procédures de détection des fuites

La détection des fuites d'hydrogène est essentielle à la sécurité d'exploitation.

Méthodes :

- Essai à la solution savonneuse
- Détecteurs électroniques d'hydrogène
- Détecteurs ultrasonores de fuite
- Essai de décroissance de pression

Procédure :

1. Mettre le système sous pression.
2. Inspecter les joints et raccords.
3. Surveiller les indications des détecteurs.
4. Réparer les fuites identifiées.

La détection des fuites prévient les risques d'incendie, réduit les pertes d'hydrogène et améliore la sécurité du système.

3.4. Techniques de surveillance des performances

3.4.1. Surveillance de la tension et du courant

La surveillance électrique permet d'évaluer les performances opérationnelles de la pile à combustible.

Paramètres surveillés :

- Tension du stack
- Courant de sortie
- Puissance de sortie
- Stabilité de la tension

Équation de puissance :

$$P = V \times I$$

où P est la puissance, V la tension et I le courant.

La surveillance de la sortie électrique permet de détecter une dégradation des performances, d'améliorer l'analyse du rendement et de faciliter le dépannage.

3.4.2. Mesure du rendement

La mesure du rendement évalue les performances de conversion énergétique de la pile à combustible.

$$\eta = (\text{énergie électrique de sortie} / \text{énergie du combustible à l'entrée}) \times 100 \%$$

Facteurs influençant le rendement :

- Température de fonctionnement
- Pureté du combustible
- Taux d'utilisation de l'hydrogène
- Conditions de charge

Le suivi du rendement améliore la gestion opérationnelle, réduit la consommation de combustible et soutient l'optimisation.

3.4.3. Analyse de la consommation d'hydrogène

L'analyse de la consommation d'hydrogène évalue l'efficacité d'utilisation du combustible.

$$U_H = (\text{hydrogène consommé} / \text{hydrogène fourni}) \times 100 \%$$

Objectifs de surveillance :

- Réduire le gaspillage d'hydrogène
- Améliorer le rendement
- Optimiser les conditions de fonctionnement

Équipements :

- Débitmètres
- Capteurs de pression
- Analyseurs de gaz

3.4.4. Journalisation et analyse des données

Les systèmes de journalisation enregistrent les paramètres opérationnels aux fins d'analyse.

- Tension
- Courant
- Température
- Pression
- Débit d'hydrogène

Bénéfices de l'analyse :

- Identification des tendances
- Prédiction des défauts
- Optimisation des performances
- Planification de la maintenance

3.5. Sécurité et normes de maintenance

3.5.1. Procédures de consignation des énergies (LOTO)

Les procédures de consignation des énergies (lockout/tagout, LOTO) isolent les équipements pendant les interventions de maintenance.

Objectifs :

- Empêcher un démarrage accidentel
- Protéger le personnel de maintenance
- Améliorer la sécurité au travail

Procédure :

1. Arrêter l'équipement.
2. Isoler les sources d'énergie.
3. Poser les dispositifs de consignation.
4. Apposer les étiquettes d'avertissement.
5. Vérifier l'isolement du système.

3.5.2. Manipulation des gaz dangereux

La manipulation de l'hydrogène exige des procédures de sécurité strictes.

- Assurer une ventilation appropriée
- Éviter les sources d'inflammation
- Surveiller la concentration de gaz
- Utiliser des équipements approuvés

Caractéristiques de danger :

- Forte inflammabilité
- Dispersion rapide du gaz
- Flamme peu visible

3.5.3. Exigences relatives aux EPI de maintenance

Les équipements de protection individuelle protègent le personnel de maintenance.

- Gants de sécurité
- Lunettes de protection
- Vêtements ignifuges
- Appareils de protection respiratoire
- Chaussures de sécurité

Les EPI réduisent le risque de blessure, améliorent la sécurité au travail et protègent contre les expositions dangereuses.

3.5.4. Conformité aux normes de maintenance

Les activités de maintenance doivent respecter les normes de sécurité industrielle.

- Normes ISO
- Normes IEC
- Réglementations OSHA en matière de sécurité
- Codes NFPA relatifs à la sécurité de l'hydrogène

Domaines couverts :

- Entretien des équipements
- Manipulation des gaz

- Sécurité électrique
- Procédures de maintenance

3.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les techniques de maintenance préventive, les procédures d'inspection et les méthodes de surveillance des performances utilisées dans les systèmes énergétiques à hydrogène. Il a traité de la maintenance planifiée, de l'entretien des piles à combustible, de la maintenance du stockage d'hydrogène, des procédures de détection de fuite et de la maintenance des systèmes de refroidissement. Les apprenants ont aussi étudié la surveillance des performances électriques, la mesure du rendement, l'analyse de la consommation d'hydrogène et la journalisation des données. Enfin, les procédures de sécurité de maintenance — consignation LOTO, manipulation des gaz dangereux, EPI et conformité aux normes — ont été abordées afin de garantir une exploitation sûre et fiable.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquer l'importance de la maintenance préventive dans les systèmes énergétiques à hydrogène.
2. Décrire les procédures d'inspection d'un stack de pile à combustible.
3. Expliquer l'importance de l'évaluation de l'état de la membrane.
4. Décrire les procédures d'inspection des réservoirs de stockage d'hydrogène.
5. Présenter les méthodes courantes de détection des fuites d'hydrogène.
6. Expliquer l'importance de la mesure du rendement dans les systèmes à pile à combustible.
7. Présenter le rôle de la journalisation des données dans la surveillance des performances.
8. Expliquer les procédures de consignation LOTO utilisées pendant les interventions de maintenance.

H2-A4-4 — Diagnostic des défauts et dépannage des systèmes énergétiques à hydrogène

Les systèmes énergétiques à hydrogène peuvent subir des défauts liés à des défaillances mécaniques, des problèmes électriques, des interruptions d'alimentation en combustible, des dysfonctionnements de capteurs ou des conditions environnementales. Un diagnostic et un dépannage efficaces sont essentiels pour maintenir une exploitation sûre, fiable et efficace. Les opérateurs et techniciens doivent pouvoir identifier les comportements anormaux, analyser les symptômes et appliquer des actions correctives selon des procédures de dépannage normalisées.

Ce chapitre présente les principes du diagnostic des défauts, les techniques de dépannage des piles à combustible, l'analyse des défauts des systèmes à hydrogène, le dépannage des systèmes électriques et de contrôle ainsi que les procédures d'intervention d'urgence.

4.1. Introduction au diagnostic des défauts

Catégories de défauts courantes :

- Défauts mécaniques
- Défauts électriques
- Défauts d'alimentation en combustible
- Défauts du système de refroidissement
- Défauts des capteurs et des communications

Exemples :

- Fuite d'hydrogène
- Instabilité de tension
- Défaillance de pompe
- Surchauffe
- Dysfonctionnement du contrôleur

Une identification correcte des défauts accélère le dépannage, réduit les temps d'arrêt et améliore la précision des réparations.

4.1.1. Symptômes de dysfonctionnement du système

Les symptômes signalent des conditions de fonctionnement anormales.

- Réduction de la puissance de sortie
- Élévation anormale de la température
- Fluctuations de pression
- Bruit ou vibration inhabituels
- Activation d'une alarme

Une observation attentive permet de détecter les défauts précocement, de prévenir des dommages importants et d'améliorer la planification de la maintenance.

4.1.2. Procédures de diagnostic

Les procédures de diagnostic permettent d'identifier la cause racine des défauts.

1. Observer les symptômes du système.
2. Examiner les indicateurs d'alarme.
3. Inspecter les composants du système.
4. Mesurer les paramètres de fonctionnement.
5. Comparer les mesures aux valeurs de référence.
6. Identifier les composants défectueux.

Outils de diagnostic :

- Multimètres
- Manomètres
- Caméras thermiques
- Détecteurs de gaz
- Logiciels de diagnostic

4.1.3. Flux de dépannage

Le dépannage suit un processus systématique :

1. Identifier le problème.
2. Isoler la source du défaut.
3. Analyser les causes possibles.
4. Appliquer les actions correctives.
5. Vérifier le fonctionnement du système.

Une méthode structurée réduit le temps de dépannage, améliore la sécurité et évite la répétition des défauts.

4.2. Dépannage des systèmes à pile à combustible

4.2.1. Diagnostic d'une chute de tension

Une chute de tension peut révéler un problème de performance de la pile à combustible.

Causes possibles :

- Manque de combustible
- Dessèchement de la membrane
- Dégradation du catalyseur
- Augmentation de la résistance électrique

Procédures de diagnostic :

- Mesurer la tension du stack
- Inspecter le système d'alimentation en combustible
- Contrôler l'état de la membrane
- Vérifier les connexions électriques

Actions correctives :

- Rétablir le débit de combustible
- Remplacer les composants endommagés
- Améliorer le refroidissement et l'humidification

Problèmes d'alimentation en combustible

Les défauts d'alimentation en combustible réduisent le rendement et la puissance de sortie de la pile à combustible.

Problèmes courants :

- Faible pression d'hydrogène
- Conduites de combustible obstruées
- Dysfonctionnement de vanne
- Contamination du gaz

Procédures de dépannage :

- Inspecter les tuyauteries de combustible
- Tester les régulateurs de pression
- Contrôler les systèmes de régulation de débit
- Vérifier la pureté du gaz

Processus de diagnostic des pannes de cellule de combustible

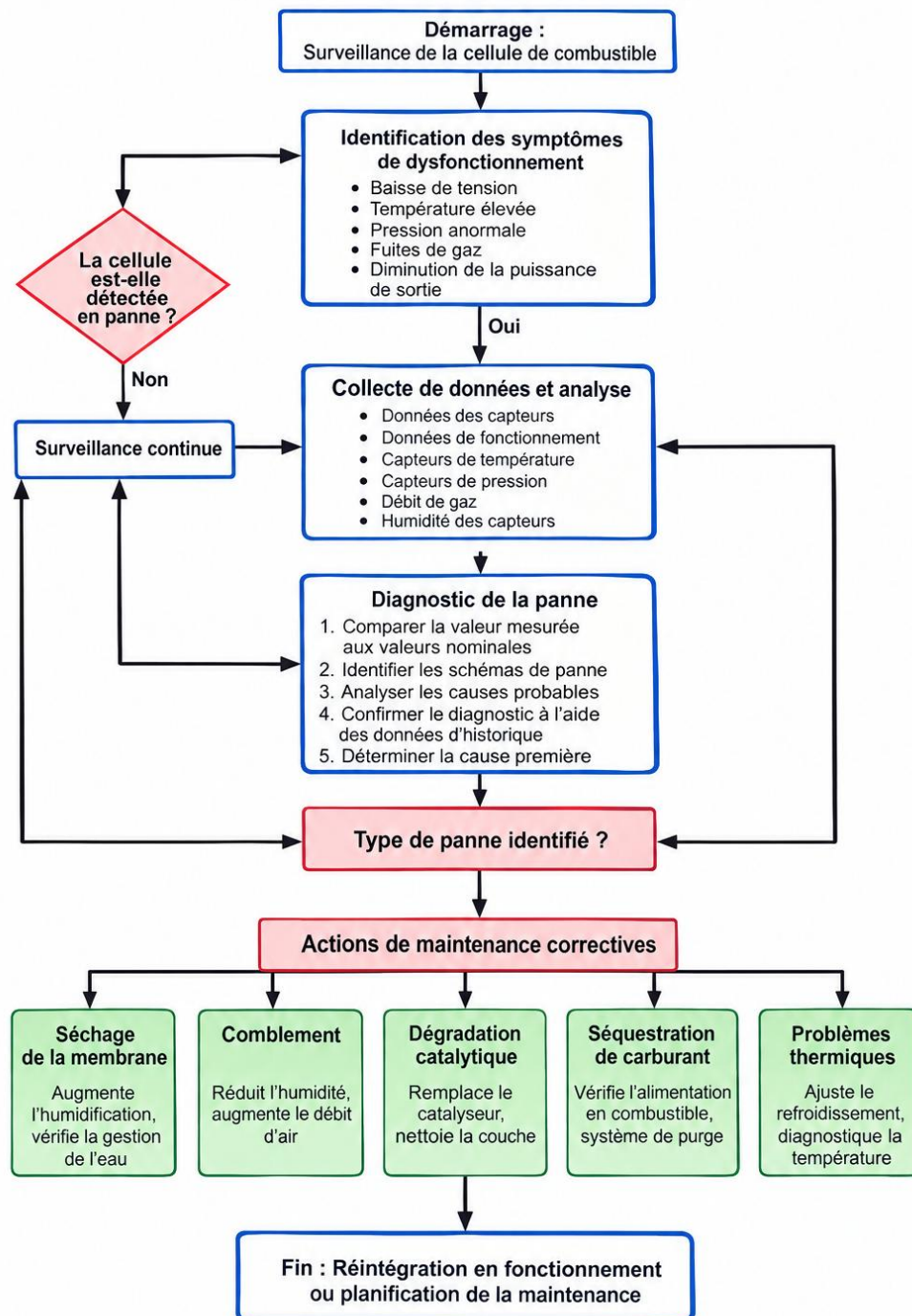


Figure 4.1 — Organigramme de diagnostic des défauts d'une pile à combustible

4.2.2. Identification d'une défaillance de membrane

Les membranes peuvent se dégrader sous l'effet du vieillissement ou de la contamination.

Signes :

- Crossover des gaz
- Baisse de tension
- Déséquilibre hydrique

- Fuite d'hydrogène

Méthodes d'inspection :

- Inspection visuelle
- Essais de performance
- Essais d'étanchéité

Mesures correctives :

- Remplacement de la membrane
- Amélioration de la gestion de l'eau
- Maîtrise de la contamination

4.2.3. Défaits du système de refroidissement

Les problèmes du système de refroidissement peuvent provoquer une surchauffe.

Défauts courants :

- Défaillance de pompe
- Fuite de fluide de refroidissement
- Échangeur de chaleur obstrué
- Dysfonctionnement de ventilateur

Procédures de dépannage :

- Inspecter le débit du fluide de refroidissement
- Contrôler le fonctionnement de la pompe
- Nettoyer les composants de refroidissement
- Vérifier les mesures de température

4.3. Diagnostic des défauts du système à hydrogène

4.3.1. Détection des fuites d'hydrogène

Les fuites d'hydrogène présentent des risques importants pour la sécurité. Les méthodes citées comprennent les détecteurs électroniques de gaz, la solution savonneuse, la détection ultrasonore et l'essai de décroissance de pression.

Indicateurs :

- Activation d'une alarme
- Perte de pression
- Mesures de gaz anormales

Actions correctives :

- Isoler la source de la fuite
- Réparer les raccords endommagés

- Retester l'intégrité du système

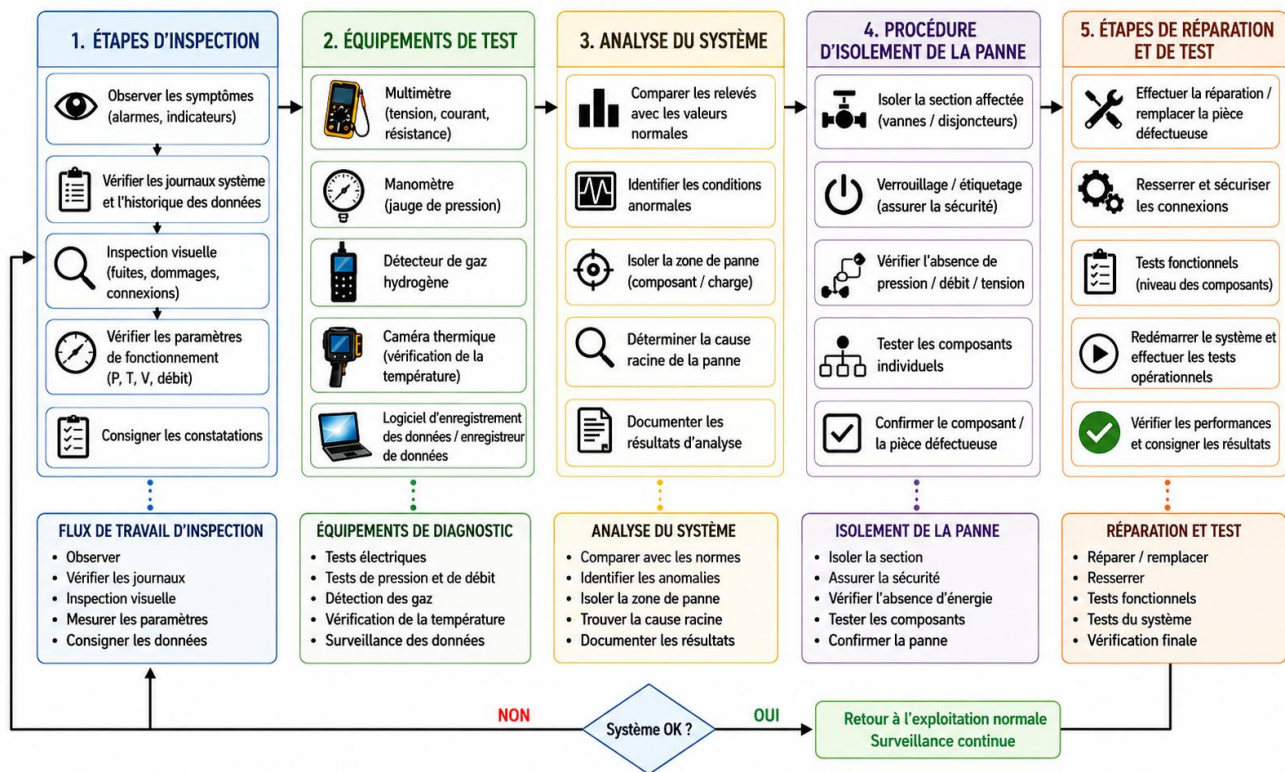


Figure 4.2 — Processus de dépannage d'un système énergétique à hydrogène

4.3.2. Défaits d'instabilité de pression

L'instabilité de pression affecte l'alimentation en combustible et le fonctionnement du système.

Causes courantes :

- Régulateurs de pression défectueux
- Dysfonctionnement de vanne
- Restrictions du débit de gaz
- Erreurs de capteurs

Procédures de dépannage :

- Inspecter les dispositifs de régulation de pression
- Vérifier les mesures des capteurs
- Contrôler les tuyauteries

4.3.3. Défaillances du système de stockage

Les défaillances du stockage peuvent résulter de problèmes mécaniques ou opérationnels.

Défaillances courantes :

- Fuite du réservoir
- Corrosion
- Défaillance de vanne

- Dommage structurel

Méthodes d'inspection :

- Inspection visuelle
- Essais de pression
- Contrôles ultrasonores

Actions correctives :

- Réparer ou remplacer les composants endommagés
- Améliorer les procédures de maintenance

4.3.4. Problèmes de contamination du gaz

La contamination du gaz dégrade les performances des piles à combustible.

Sources :

- Humidité
- Particules de poussière
- Contamination par l'huile
- Infiltration d'air

Effets :

- Dommages à la membrane
- Baisse de rendement
- Corrosion

Prévention :

- Utiliser des systèmes de filtration
- Surveiller la pureté du gaz
- Maintenir l'étanchéité des systèmes

4.4. Dépannage des systèmes électriques et de contrôle

4.4.1. Défaillances des capteurs

Les défauts de capteurs produisent des données système inexacts.

Problèmes courants :

- Dérive d'étalonnage
- Endommagement du câblage
- Interruption du signal
- Contamination du capteur

Méthodes de dépannage :

- Étalonnage du capteur

- Inspection du câblage
- Essai du signal
- Remplacement du capteur

4.4.2. Défaits du système de communication

Les systèmes de communication transfèrent les données opérationnelles entre les composants.

Défaits courants :

- Perte de signal
- Interruption du réseau
- Défaillance de communication du contrôleur

Procédures de diagnostic :

- Inspecter les câbles de communication
- Tester les connexions réseau
- Vérifier le fonctionnement du contrôleur

4.4.3. Diagnostic d'un dysfonctionnement du contrôleur

Les contrôleurs régulent le fonctionnement et la sécurité du système.

Défaits courants :

- Erreurs logicielles
- Défaillance de l'alimentation électrique
- Programmation incorrecte
- Surchauffe

Actions correctives :

- Redémarrer le contrôleur
- Mettre à jour le logiciel
- Remplacer les modules défectueux

4.4.4. Dépannage de l'électronique de puissance

L'électronique de puissance assure la conversion et la distribution de l'énergie électrique.

Composants :

- Onduleurs
- Convertisseurs DC-DC
- Redresseurs
- Dispositifs de protection des circuits

Défaits courants :

- Surchauffe

- Instabilité de tension
- Courts-circuits
- Défaillance de composants

Procédures de dépannage :

- Inspecter les connexions électriques
- Mesurer la tension et le courant
- Remplacer les composants endommagés

4.5. Intervention d'urgence et actions correctives

4.5.1. Procédures d'arrêt d'urgence

Les systèmes d'arrêt d'urgence interrompent le fonctionnement dans des conditions dangereuses.

Déclencheurs :

- Fuite d'hydrogène
- Détection d'incendie
- Pression excessive
- Défauts électriques

Procédure :

- Activer le système d'arrêt d'urgence
- Isoler l'alimentation en hydrogène
- Couper l'alimentation électrique
- Évacuer la zone affectée

4.5.2. Intervention en cas d'incendie et de fuite de gaz

Les incendies et fuites d'hydrogène exigent une intervention immédiate selon les procédures d'urgence du site.

Actions citées dans le document source :

- Activer les alarmes
- Couper l'alimentation en combustible
- Utiliser les moyens d'extinction approuvés
- Ventiler la zone
- Avertir les services d'intervention d'urgence

Précautions de sécurité :

- Éviter les sources d'inflammation
- Utiliser des EPI ignifuges
- Maintenir des itinéraires d'évacuation sûrs

4.5.3. Actions de maintenance corrective

La maintenance corrective rétablit le fonctionnement normal après l'apparition d'un défaut. Les principales activités citées sont le remplacement des composants défectueux, la réparation des tuyauteries endommagées, l'étalonnage des capteurs et l'essai des systèmes réparés.

Objectifs :

- Rétablir la fiabilité du système
- Prévenir la répétition des défaillances
- Améliorer la sécurité d'exploitation

4.5.4. Procédures de rapport d'incident

Les rapports d'incident documentent les défauts et événements d'urgence.

Informations à consigner :

- Description du défaut
- Heure et lieu
- Actions correctives réalisées
- Personnel impliqué

Le rapport d'incident améliore la gestion de la sécurité, facilite les dépannages futurs et contribue à prévenir la répétition des incidents.

4.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les principes et procédures de diagnostic des défauts et de dépannage des systèmes énergétiques à hydrogène. Il a traité des types de défauts, des symptômes de dysfonctionnement, des méthodes de diagnostic et des flux de dépannage. Les apprenants ont étudié les techniques de dépannage des piles à combustible, la détection des fuites d'hydrogène, l'analyse de l'instabilité de pression, le dépannage des capteurs et contrôleurs ainsi que le diagnostic de l'électronique de puissance. Enfin, les procédures d'arrêt d'urgence, les actions en cas d'incendie et de fuite, la maintenance corrective et le rapport d'incident ont été abordés afin de garantir une exploitation sûre et fiable.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquer l'importance d'un diagnostic systématique des défauts dans les systèmes énergétiques à hydrogène.
2. Décrire les symptômes courants de dysfonctionnement d'une pile à combustible.
3. Présenter les causes d'une chute de tension dans un système à pile à combustible.
4. Expliquer les méthodes utilisées pour détecter les fuites d'hydrogène.
5. Décrire les procédures de dépannage des défauts du système de refroidissement.
6. Expliquer les causes de l'instabilité de pression dans les systèmes à hydrogène.
7. Présenter les défauts courants des systèmes électriques et de contrôle.

8. Expliquer les procédures d'arrêt d'urgence et de maintenance corrective dans les systèmes énergétiques à hydrogène.

Applications de l'hydrogène et projet de conception de systèmes intégrés

Description du cours

Ce cours fondé sur des projets porte sur des applications réelles de l'hydrogène, la conception de systèmes énergétiques hydrogène intégrés, la simulation, l'optimisation et des études de cas d'ingénierie. Il renforce les capacités pratiques de résolution de problèmes, les compétences d'innovation, le travail en équipe et les compétences de conception d'ingénierie au moyen de projets pratiques et d'activités d'apprentissage appliqué liés à la production d'hydrogène, au stockage, aux piles à combustible et à l'intégration des énergies renouvelables.

Acquis d'apprentissage du cours

1. Concevoir des systèmes énergétiques hydrogène intégrés pour des applications pratiques.
2. Appliquer des outils de simulation et d'optimisation à l'analyse et à la conception de systèmes hydrogène.
3. Évaluer les performances techniques, économiques et environnementales de projets énergétiques hydrogène.
4. Développer des solutions d'ingénierie innovantes pour des systèmes énergétiques fondés sur l'hydrogène.
5. Présenter et documenter des projets de conception de systèmes hydrogène selon les pratiques professionnelles de l'ingénierie.

Applications de l'hydrogène et fondamentaux de la conception des systèmes

Les technologies énergétiques de l'hydrogène sont de plus en plus utilisées dans les transports, l'industrie, l'intégration des énergies renouvelables et les systèmes de production décentralisée en raison de leur rendement élevé, de leur flexibilité et de leurs avantages environnementaux. Les projets modernes liés à l'hydrogène exigent des ingénieurs et des techniciens qu'ils maîtrisent non seulement les technologies de l'hydrogène, mais aussi la conception de systèmes intégrés, la simulation, l'optimisation, les normes de sécurité et les méthodes de mise en œuvre pratique.

Ce chapitre présente les applications pratiques de l'hydrogène et les principes fondamentaux de la conception de systèmes énergétiques hydrogène intégrés. Les apprenants étudieront les applications de l'hydrogène dans plusieurs secteurs et développeront des compétences en méthodologies de conception d'ingénierie, concepts d'intégration de systèmes, sélection des composants et pratiques de conception orientées vers la sécurité utilisées dans des projets énergétiques hydrogène réels.

1.1. Vue d'ensemble des applications énergétiques de l'hydrogène

Les systèmes énergétiques hydrogène sont utilisés dans plusieurs secteurs afin de soutenir la production d'énergie propre, le stockage d'énergie, les transports et la décarbonation industrielle.

1.1.1. Hydrogène dans les systèmes de transport

L'hydrogène est largement utilisé dans les systèmes de transport à pile à combustible en raison de sa forte densité énergétique massique et de ses faibles émissions à l'usage. Ses applications de transport comprennent les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV), les autobus et camions à hydrogène, le transport ferroviaire, les applications maritimes et les systèmes de soutien à l'aviation.

Principaux composants des systèmes de transport à hydrogène :

- Réservoirs de stockage d'hydrogène
- Empilement de piles à combustible
- Moteur électrique
- Système de batterie d'appoint
- Électronique de puissance

Pour les projets de transport, les concepteurs doivent prendre en compte la demande de puissance du véhicule, l'autonomie, l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène, les exigences de sécurité ainsi que les contraintes de masse et d'encombrement du système.

Avantages

- Aucune émission à l'échappement
- Ravitaillement rapide

- Grande autonomie opérationnelle
- Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles

1.1.2. Applications industrielles de l'hydrogène

Les industries utilisent l'hydrogène aussi bien comme vecteur énergétique que comme matière première pour des procédés chimiques, notamment dans :

- la sidérurgie
- les procédés chimiques
- la production d'engrais
- les opérations de raffinage
- les systèmes industriels d'alimentation de secours

L'hydrogène aide les industries à réduire :

- les émissions de carbone
- la consommation de combustibles fossiles
- la pollution environnementale

L'hydrogène joue ainsi un rôle important dans la décarbonation industrielle. La conception de systèmes hydrogène industriels exige notamment :

- un stockage d'hydrogène à grande échelle
- des réseaux de tuyauterie haute pression
- une forte fiabilité en fonctionnement continu
- le respect des exigences de sécurité industrielle

1.1.3. Hydrogène pour la production d'électricité

Les systèmes hydrogène sont de plus en plus utilisés pour produire de l'électricité propre. Les applications comprennent notamment :

- les centrales à piles à combustible
- les systèmes d'alimentation de secours
- la production décentralisée
- les micro-réseaux
- les systèmes de stabilisation du réseau

Processus de conversion énergétique de l'hydrogène :



Dans la pratique, les systèmes de production électrique à hydrogène conviennent aux communautés isolées, aux hôpitaux et centres de données, au stockage des énergies renouvelables et à l'alimentation électrique d'urgence.

1.1.4. Applications résidentielles et commerciales

Les technologies de l'hydrogène soutiennent les systèmes énergétiques résidentiels et commerciaux dans les applications suivantes :

- cogénération — production combinée de chaleur et d'électricité (CHP)
- systèmes résidentiels à pile à combustible
- gestion énergétique des bâtiments
- systèmes d'alimentation électrique de secours

Avantages

- Amélioration du rendement énergétique
- Réduction du coût de l'électricité
- Alimentation électrique fiable
- Impact environnemental réduit

La conception de systèmes énergétiques hydrogène pour ces usages comporte plusieurs difficultés :

- espace d'installation limité
- contraintes de coût
- exigences de sécurité
- intégration avec les systèmes existants

1.2. Fondamentaux de la conception de systèmes hydrogène intégrés

La conception d'un système hydrogène intégré associe plusieurs technologies au sein d'un système énergétique coordonné capable de produire, stocker et utiliser efficacement l'hydrogène. Les systèmes énergétiques hydrogène sont conçus pour assurer un fonctionnement sûr, fiable et efficace.

Principaux objectifs de conception :

- maximiser le rendement du système
- assurer la sécurité de fonctionnement
- améliorer la fiabilité
- optimiser la gestion de l'énergie
- réduire l'impact environnemental

Caractéristiques des systèmes intégrés :

- plusieurs composants interconnectés
- systèmes de commande coordonnés
- intégration des énergies renouvelables
- capacité de stockage d'énergie

Éléments pris en compte lors de la conception :

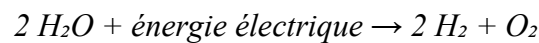
- demande de charge

- évolutivité du système
- conditions environnementales
- faisabilité économique

Analyse des flux d'énergie : elle évalue la manière dont l'énergie circule dans le système hydrogène. Les principales étapes sont :

1. production d'énergie renouvelable
2. conversion de puissance électrique
3. production d'hydrogène
4. stockage d'hydrogène
5. production d'électricité par pile à combustible
6. utilisation par la charge

Équation générale de l'électrolyse :



L'analyse des flux d'énergie aide à identifier les pertes, améliorer le rendement, optimiser le dimensionnement du système et équilibrer l'offre et la demande d'énergie.

Principes d'intégration des systèmes : les systèmes intégrés combinent différents sous-systèmes dans une structure opérationnelle unifiée.

- source d'énergie renouvelable
- système d'électrolyse
- stockage d'hydrogène
- système de pile à combustible
- stockage sur batteries
- système de conditionnement de puissance

L'intégration vise à améliorer la coordination, renforcer la fiabilité énergétique et réduire les interruptions de fonctionnement. Dans la pratique, elle peut être limitée par la compatibilité des tensions, la coordination des communications, les variations dynamiques de charge et la gestion thermique.

Exigences et spécifications de conception : les spécifications d'ingénierie définissent les performances et les exigences de fonctionnement du système.

- puissance de sortie
- débit de production d'hydrogène
- capacité de stockage
- rendement du système
- pression et température de fonctionnement

Spécifications techniques :

- caractéristiques électriques nominales

- dimensions mécaniques
- limites de sécurité
- normes de protection environnementale

Des spécifications claires améliorent les performances du système, réduisent les erreurs de conception et facilitent la maintenance ainsi que le dépannage.

1.3. Composants des systèmes hydrogène intégrés

Les systèmes hydrogène intégrés comprennent plusieurs composants interconnectés qui fonctionnent ensemble pour produire et utiliser l'énergie hydrogène. La figure 1.1 représente une source renouvelable, un électrolyseur, le stockage d'hydrogène, une pile à combustible, un contrôleur et des charges électriques.

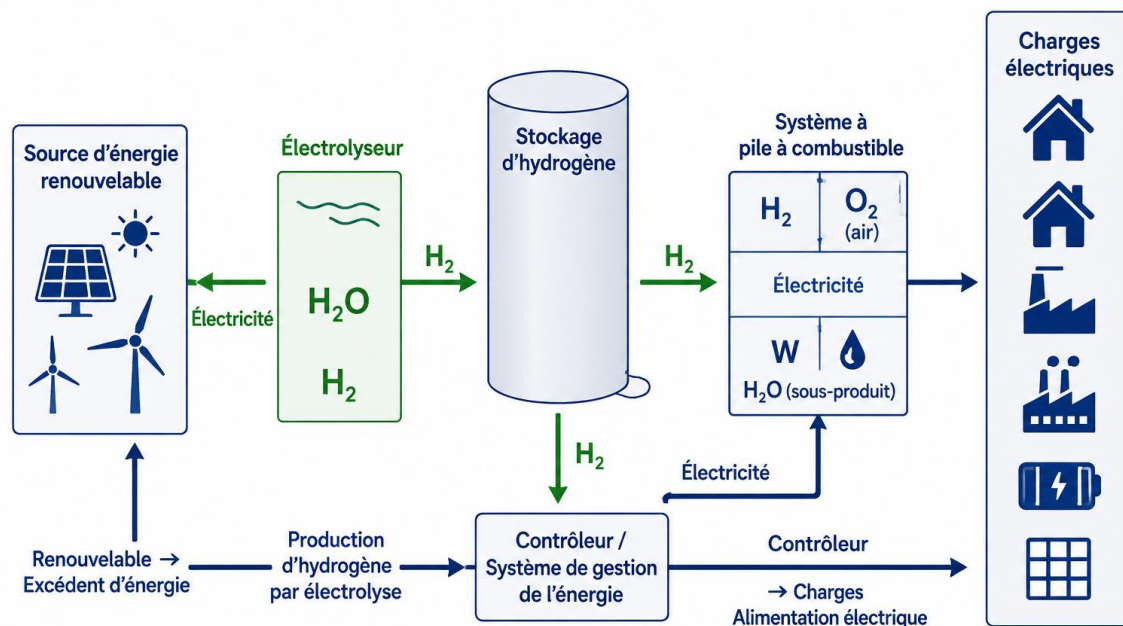


Figure 1.1 — Système énergétique hydrogène intégré

a) Électrolyseurs

Les électrolyseurs produisent de l'hydrogène à partir d'eau au moyen d'électricité. Ils peuvent être alcalins, à membrane échangeuse de protons (PEM) ou à oxyde solide. Leurs principaux composants comprennent :

- empilement de cellules de l'électrolyseur
- système d'alimentation en eau
- alimentation électrique
- séparateur de gaz

La conception pratique d'un électrolyseur intégré doit tenir compte de la qualité de l'eau, du rendement de fonctionnement, des besoins de refroidissement et de l'intégration électrique.

b) Systèmes de stockage de l'hydrogène

Les systèmes de stockage conservent l'hydrogène en sécurité pour une utilisation ultérieure. Les méthodes comprennent :

- stockage sous forme de gaz comprimé
- stockage d'hydrogène liquide
- stockage sur hydrures métalliques

Exigences de conception :

- résistance à la pression
- prévention des fuites
- systèmes de sécurité
- dimensionnement du stockage

Considérations pratiques :

- pression de stockage
- besoins d'espace
- coût
- réglementations de sécurité

c) Systèmes de piles à combustible

Les piles à combustible convertissent l'hydrogène en énergie électrique. Leurs principaux composants sont :

- empilement de piles à combustible
- système d'alimentation en air
- système de refroidissement
- électronique de puissance

Les applications pratiques comprennent l'alimentation de secours, les systèmes de transport et la production décentralisée.

d) Sources d'énergie renouvelable (SER)

Les SER fournissent une électricité propre pour la production d'hydrogène. Les sources courantes sont :

- systèmes solaires photovoltaïques
- éoliennes
- systèmes hydroélectriques

Dans les systèmes hydrogène, les énergies renouvelables soutiennent la production d'hydrogène vert, réduisent les émissions de carbone et améliorent la durabilité énergétique.

e) Électronique de puissance et contrôleurs (PEC)

L'électronique de puissance régule et gère les flux d'énergie électrique. Les principaux composants comprennent :

- onduleurs
- convertisseurs CC-CC

- contrôleurs
- systèmes de protection

Fonctions :

- régulation de la tension
- conversion de puissance
- gestion des charges
- protection du système

Dans la pratique, l'électronique de puissance et les contrôleurs contribuent à améliorer le rendement, stabiliser le fonctionnement et protéger les composants du système.

1.4. Méthodologie de conception d'ingénierie

La méthodologie de conception d'ingénierie fournit un processus structuré pour développer les systèmes énergétiques hydrogène. La figure 1.2 présente les étapes de planification, conception conceptuelle, simulation, optimisation, mise en œuvre et évaluation.

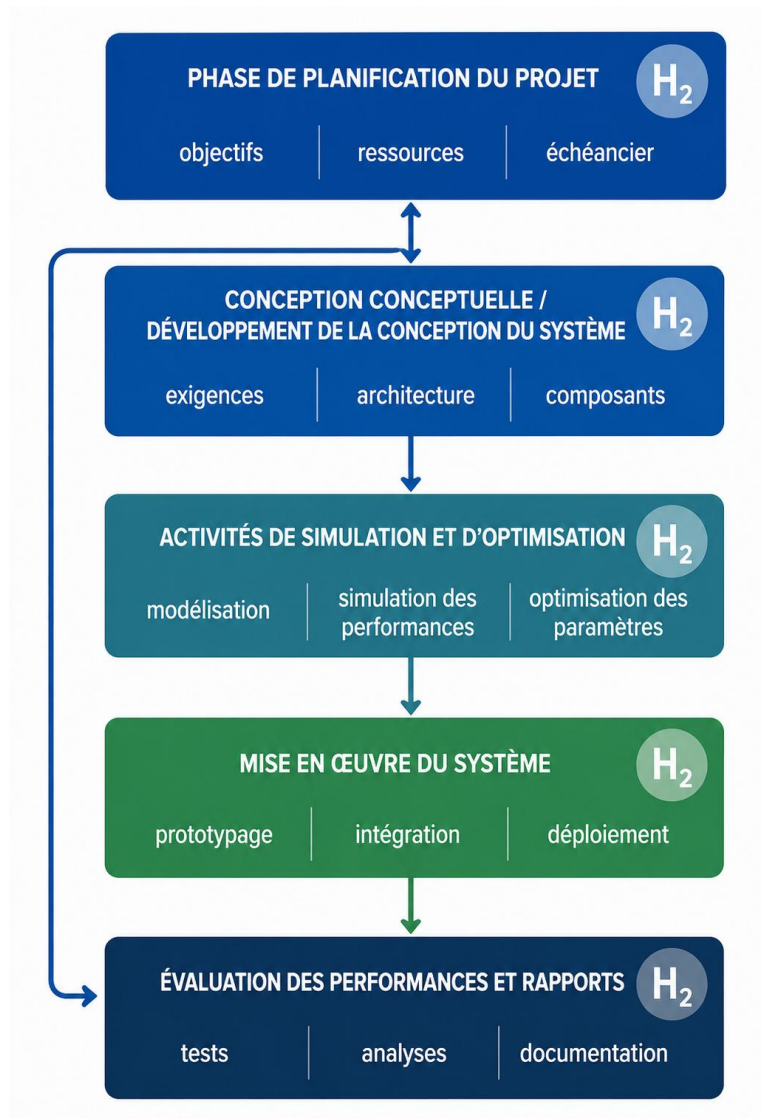


Figure 1.2 — Processus de conception d'un système hydrogène

a) Identification du problème

Les projets d'ingénierie commencent par l'identification d'un problème opérationnel ou énergétique. Les problèmes fréquents comprennent :

- alimentation électrique peu fiable
- émissions de carbone élevées
- absence de stockage d'énergie
- variabilité des énergies renouvelables

Activités pratiques :

- évaluation du site
- analyse de la demande énergétique
- consultation des parties prenantes

b) Analyse des exigences

L'analyse des exigences définit les besoins du système et les objectifs du projet. Les exigences peuvent porter sur :

- la demande de puissance
- la capacité de production d'hydrogène
- les conditions environnementales
- les limites budgétaires
- les exigences de sécurité

Cette analyse guide la conception du système, évite des erreurs de projet et soutient l'évaluation de la faisabilité.

c) Élaboration de la conception conceptuelle

La conception conceptuelle élabore plusieurs solutions d'ingénierie possibles. Les activités comprennent :

- développement de l'architecture du système
- sélection des composants
- calculs préliminaires
- planification des flux d'énergie

Livrables pratiques :

- schémas-blocs
- diagrammes de flux de procédé
- modèles initiaux du système

d) Évaluation de la faisabilité technique

L'analyse de faisabilité évalue si le projet peut fonctionner avec succès. Les domaines d'évaluation sont :

- faisabilité technique
- faisabilité économique
- impact environnemental

- fiabilité opérationnelle

Méthodes pratiques d'évaluation :

- études de simulation
- analyse des coûts
- estimation des performances
- évaluation des risques

1.5. Normes de conception et sécurité des systèmes hydrogène

La conception des systèmes hydrogène doit respecter les normes de sécurité industrielles et les réglementations d'ingénierie.

a) Normes de conception d'ingénierie

Les normes de conception fournissent des lignes directrices techniques pour une conception sûre. Les organismes couramment cités comprennent :

- ISO
- IEC
- NFPA
- SAE International

Domaines couverts :

- stockage de l'hydrogène
- sécurité électrique
- systèmes sous pression
- systèmes de piles à combustible

Les normes améliorent la sécurité, assurent la compatibilité et favorisent un fonctionnement fiable.

b) Exigences de sécurité de l'hydrogène et évaluation des risques

Les systèmes hydrogène exigent des mesures de sécurité spécifiques. Les risques comprennent :

- fuites de gaz
- risques d'incendie
- stockage haute pression
- risques électriques

Mesures de sécurité :

- systèmes de détection des fuites
- systèmes de ventilation
- systèmes d'arrêt d'urgence
- dispositifs de décharge de pression

Pratiques de sécurité :

- mise à la terre appropriée
- signalisation des dangers
- installation sûre de la tuyauterie
- formation des opérateurs

L'évaluation des risques identifie les dangers et évalue la sécurité du système. Les étapes courantes sont :

1. identification des dangers
2. évaluation des risques
3. mise en œuvre de mesures de maîtrise
4. planification des situations d'urgence

Méthodes d'évaluation courantes :

- études HAZOP
- analyse des modes de défaillance
- inspections de sécurité

L'évaluation des risques réduit la probabilité d'accident, améliore la sécurité de fonctionnement et soutient la conformité réglementaire.

c) Considérations environnementales

Les systèmes hydrogène doivent limiter leur impact environnemental. Les facteurs à examiner comprennent :

- réduction des émissions
- utilisation de l'eau
- maîtrise du bruit
- gestion des déchets

Principes de conception durable :

- intégration des énergies renouvelables
- utilisation efficace de l'énergie
- technologies à faibles émissions

Les considérations environnementales favorisent le développement durable, des systèmes énergétiques plus propres et la conformité réglementaire.

1.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les apprenants ont étudié les applications pratiques de l'énergie hydrogène et les principes fondamentaux de la conception de systèmes hydrogène intégrés. Le chapitre a présenté les applications dans les transports, l'industrie, la production d'électricité et les systèmes résidentiels. Les apprenants ont également exploré les concepts de conception, l'analyse des flux d'énergie, les principes d'intégration et les principaux composants, notamment les électrolyseurs, les systèmes de stockage, les piles à combustible et les sources d'énergie renouvelable. Enfin, la méthodologie de conception d'ingénierie, l'évaluation de la faisabilité technique, les normes de sécurité, les procédures d'évaluation des risques et les considérations

environnementales ont été abordées afin de soutenir la conception pratique et le développement de projets hydrogène.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez les principales applications des systèmes énergétiques hydrogène dans les industries modernes.
2. Discutez du rôle de l'hydrogène dans les systèmes de transport.
3. Expliquez l'importance de la conception intégrée des systèmes hydrogène.
4. Décrivez les principaux composants d'un système énergétique hydrogène intégré.
5. Discutez de l'importance de l'analyse des flux d'énergie dans les projets hydrogène.
6. Expliquez les étapes de la méthodologie de conception d'ingénierie.
7. Décrivez les exigences courantes de sécurité de l'hydrogène dans la conception des systèmes.
8. Discutez de l'importance des considérations environnementales dans les projets énergétiques hydrogène.

Simulation et modélisation des systèmes hydrogène

Les systèmes énergétiques hydrogène comportent plusieurs composants en interaction, tels que les sources d'énergie renouvelable, les électrolyseurs, les systèmes de stockage d'hydrogène, les piles à combustible, les batteries et l'électronique de puissance. Avant l'installation et la mise en œuvre physiques, les ingénieurs utilisent des techniques de simulation et de modélisation pour évaluer les performances, optimiser les flux d'énergie, améliorer le rendement et réduire les risques de conception. Pour les apprenants de l'EFTP de niveau avancé, ces techniques constituent des outils pratiques permettant d'analyser le comportement des systèmes, de tester des conditions de fonctionnement, de prévoir les défauts et d'optimiser les systèmes hydrogène intégrés. Les logiciels modernes de simulation permettent aux techniciens et ingénieurs de visualiser le fonctionnement, d'évaluer des variantes de conception et d'améliorer la prise de décision au cours du développement du projet.

Ce chapitre présente les techniques de simulation et de modélisation des systèmes énergétiques hydrogène, notamment la modélisation des piles à combustible et des électrolyseurs, la simulation des systèmes d'hydrogène renouvelable, l'évaluation des performances et les techniques d'optimisation utilisées dans des applications pratiques d'ingénierie.

2.1. Introduction à la simulation des systèmes hydrogène

La simulation d'un système hydrogène utilise des modèles mathématiques et des outils logiciels afin d'analyser les performances dans différentes conditions de fonctionnement. La figure 2.1 illustre une source renouvelable, un électrolyseur, un stockage d'hydrogène, une pile à combustible, une batterie et des blocs de charge.

2.1.1. Objectif de la simulation dans la conception d'ingénierie

La simulation aide les ingénieurs à évaluer les systèmes hydrogène avant leur mise en œuvre physique. Ses principaux objectifs sont :

- prédire les performances du système
- optimiser le dimensionnement des composants
- réduire les erreurs de conception
- améliorer le rendement énergétique
- analyser la fiabilité du système
- réduire le coût et le risque du projet

Utilisations pratiques :

- analyse des systèmes de piles à combustible
- intégration des énergies renouvelables
- dimensionnement du stockage d'hydrogène
- évaluation de la gestion de puissance

- analyse de la demande de charge

La simulation permet aux apprenants de visualiser le fonctionnement du système, tester des variantes de conception, analyser des conditions réelles de fonctionnement et développer des compétences pratiques d'ingénierie.

Flux de travail de simulation : la simulation suit généralement les étapes suivantes :

1. définir les objectifs du système
2. collecter les données d'entrée
3. développer le modèle du système
4. exécuter des scénarios de simulation
5. analyser les résultats
6. optimiser les performances

Activités pratiques :

- importer les spécifications des composants
- configurer les conditions de fonctionnement
- exécuter des simulations dynamiques
- comparer les résultats de performance

Un flux de travail structuré améliore la précision de la modélisation, simplifie le dépannage et soutient la prise de décision d'ingénierie.

Paramètres d'entrée et de sortie

Les modèles de simulation nécessitent des données d'exploitation en entrée et produisent des indicateurs de performance en sortie.

Paramètres d'entrée courants	Paramètres de sortie courants
Irradiation solaire	Puissance de sortie
Vitesse du vent	Rendement du système
Débit d'hydrogène	Débit de production d'hydrogène
Demande de charge	Pertes d'énergie
Température de fonctionnement	Réponse en tension et en courant
Conditions de pression	—

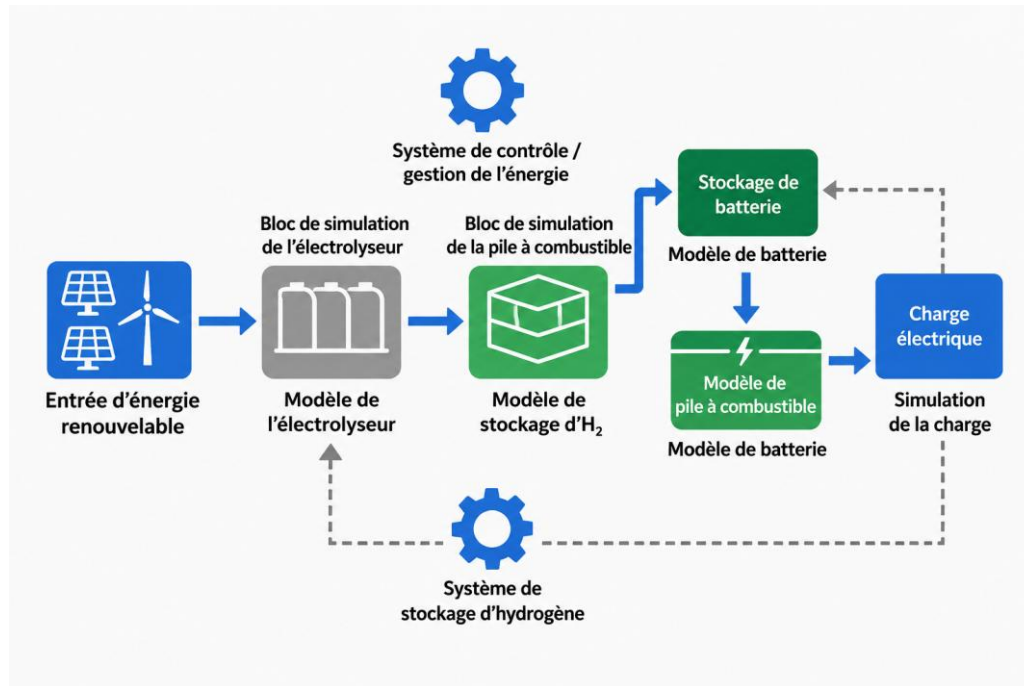


Figure 2.1 — Modèle de simulation d'un système hydrogène

Des données d'entrée précises améliorent la fiabilité de la simulation, produisent des résultats plus représentatifs du fonctionnement réel et soutiennent une meilleure optimisation de la conception.

Hypothèses de modélisation :

Les modèles de simulation emploient des hypothèses pour simplifier des systèmes d'ingénierie complexes. Exemples :

- température de fonctionnement constante
- comportement de gaz parfait
- charge électrique stable
- débit d'hydrogène uniforme

Ces hypothèses simplifient les calculs, réduisent la complexité de calcul et accélèrent la simulation. Des hypothèses inappropriées peuvent toutefois réduire la précision du modèle, produire des résultats irréalistes et affecter les décisions de conception.

2.2. Modélisation des piles à combustible et des électrolyseurs

Les modèles de piles à combustible et d'électrolyseurs servent à prévoir les performances de production d'hydrogène et de génération électrique.

a) Modélisation des performances d'une pile à combustible

Les modèles simulent les performances électriques dans différentes conditions de fonctionnement. Les principaux paramètres comprennent :

- tension de l'empilement
- densité de courant
- consommation d'hydrogène

- température
- pression

Équations de puissance et de tension de la pile à combustible :

$$P = V \times I$$

$$V = E - V_{act} - V_{ohmique} - V_{conc}$$

où P, V et I représentent respectivement la puissance de sortie, la tension et le courant ; E est la tension idéale de cellule et V_{act}, V_{ohmique} et V_{conc} correspondent respectivement aux pertes d'activation, ohmiques et de concentration.

Activités pratiques de simulation :

- analyse de la courbe de polarisation
- simulation du rendement
- essais de réponse à la charge
- analyse de conditions de défaut

b) Modélisation du fonctionnement de l'électrolyseur

Les modèles d'électrolyseurs simulent le processus de production d'hydrogène.



Paramètres de modélisation :

- puissance électrique d'entrée
- débit d'eau
- débit de production d'hydrogène
- température de fonctionnement
- rendement de l'électrolyseur

La modélisation permet de prévoir la production d'hydrogène, d'optimiser la consommation d'énergie et d'améliorer le rendement opérationnel.

c) Analyse de la production d'hydrogène

L'analyse de la production évalue la quantité d'hydrogène produite dans diverses conditions. Les facteurs comprennent la disponibilité des énergies renouvelables, la capacité de l'électrolyseur, son rendement et la puissance électrique d'entrée.

$$\text{Production de } H_2 \propto \text{puissance électrique d'entrée}$$

Activités pratiques :

- comparer la production d'hydrogène dans différentes conditions solaires ou éoliennes
- analyser les profils journaliers de production d'hydrogène
- évaluer les besoins de stockage

d) Comportement dynamique du système

Les systèmes hydrogène fonctionnent sous des conditions environnementales et de charge variables. Les conditions dynamiques comprennent :

- fluctuations des énergies renouvelables
- variation de la demande de charge
- variations de température
- opérations de démarrage et d'arrêt

Objectifs de la simulation dynamique :

- évaluer la réponse transitoire
- améliorer les stratégies de commande
- prévoir l'instabilité opérationnelle

La modélisation dynamique améliore la fiabilité, soutient le développement de commandes en temps réel et renforce la sécurité de fonctionnement.

2.3. Simulation des systèmes d'hydrogène renouvelable

Les systèmes d'hydrogène renouvelable associent des sources d'énergie renouvelable aux technologies de l'hydrogène.

2.3.1. Simulation d'un système solaire-hydrogène

Les systèmes solaire-hydrogène utilisent l'énergie photovoltaïque pour produire de l'hydrogène. Leurs principaux composants sont :

- champ photovoltaïque solaire
- électrolyseur
- stockage d'hydrogène
- système de pile à combustible
- stockage sur batteries

Paramètres de simulation :

- irradiation solaire
- puissance de sortie PV
- débit de production d'hydrogène
- état de charge de la batterie

Activités pratiques :

- analyse du profil journalier d'énergie solaire
- estimation du stockage d'hydrogène
- analyse du fonctionnement de secours par pile à combustible

2.3.2. Modélisation d'un système éolien-hydrogène

Les systèmes éolien-hydrogène utilisent l'énergie éolienne pour produire et stocker de l'hydrogène. Les composants comprennent :

- éolienne
- convertisseur de puissance
- électrolyseur
- système de stockage d'hydrogène
- empilement de piles à combustible

Dans la source, la puissance du vent est exprimée par :

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

où P est la puissance du vent, ρ la masse volumique de l'air, A la surface balayée par le rotor et v la vitesse du vent.

Activités pratiques :

- simulation d'un profil de vent
- analyse de la production d'hydrogène
- évaluation de la stabilité du système

2.3.3. Analyse de l'intégration d'un système hybride

Les systèmes hybrides intègrent plusieurs sources d'énergie et technologies de stockage. Les composants peuvent inclure :

- systèmes solaires PV
- éoliennes
- batteries
- stockage d'hydrogène
- piles à combustible

Objectifs de l'intégration :

- améliorer la fiabilité énergétique
- réduire l'intermittence des renouvelables
- équilibrer la demande de puissance

Tâches pratiques de simulation :

- analyse de l'équilibrage énergétique
- évaluation de la commande hybride
- optimisation du stockage

Simulation des flux d'énergie :

1. production d'énergie renouvelable

2. conversion de puissance
3. production d'hydrogène
4. stockage d'énergie
5. production électrique par pile à combustible
6. alimentation de la charge

La simulation des flux d'énergie aide à identifier les pertes, améliorer le rendement et optimiser la commande du système.

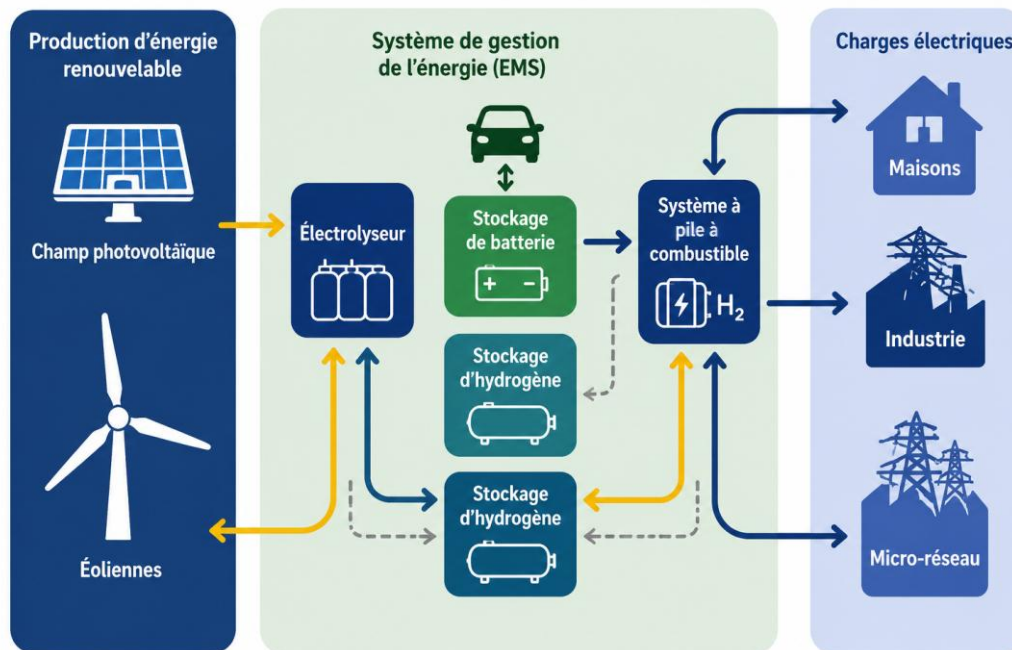


Figure 2.2 — Simulation des flux d'énergie d'un système hydrogène hybride

2.4. Évaluation des performances du système

L'évaluation des performances analyse le rendement et la fiabilité opérationnelle.

a) Analyse du rendement

L'analyse du rendement évalue l'efficacité avec laquelle le système convertit l'énergie. Le rendement est exprimé par :

$$\eta = (\text{énergie utile en sortie} / \text{énergie en entrée}) \times 100 \%$$

Les facteurs influant sur le rendement comprennent la température de fonctionnement, la pureté de l'hydrogène, les conditions de charge et les pertes des composants.

Activités pratiques :

- comparer le rendement sous différentes charges
- évaluer les pertes d'énergie
- optimiser les conditions de fonctionnement

b) Analyse de la puissance de sortie

L'analyse de puissance évalue la production d'énergie électrique. Les paramètres étudiés sont :

- tension de sortie
- courant de sortie
- stabilité de la puissance
- capacité à répondre aux pointes de charge

Cette analyse aide à dimensionner les composants, améliorer la gestion des charges et prévenir les surcharges.

c) Analyse de la consommation d'hydrogène

L'analyse de la consommation d'hydrogène évalue l'efficacité de l'utilisation du combustible. Le taux d'utilisation peut être exprimé par :

$$U_h = (\text{hydrogène consommé} / \text{hydrogène fourni}) \times 100 \%$$

Applications pratiques :

- optimiser la consommation de combustible
- améliorer le dimensionnement du stockage
- réduire le coût d'exploitation

d) Analyse de la réponse à la charge

L'analyse de la réponse à la charge évalue la manière dont le système réagit à l'évolution de la demande électrique. Les variations peuvent inclure :

- pointes soudaines de demande
- charges de démarrage
- entrée variable d'énergie renouvelable

Activités de simulation :

- essais de charge dynamique
- analyse de la stabilité de tension
- essais de coordination batterie–pile à combustible

2.5. Techniques d'optimisation

L'optimisation améliore les performances, la fiabilité et l'efficacité économique du système.

a) Méthodes d'optimisation énergétique

L'optimisation énergétique minimise les pertes et améliore le rendement opérationnel. Ses objectifs sont de :

- améliorer le rendement
- réduire le gaspillage d'énergie
- équilibrer les flux de puissance

Méthodes pratiques :

- gestion intelligente de l'énergie
- planification des charges

- coordination des batteries
- prévision de la production renouvelable

b) Optimisation du stockage d'hydrogène

L'optimisation du stockage détermine la capacité de stockage d'hydrogène appropriée. Les facteurs comprennent :

- demande d'hydrogène
- disponibilité des énergies renouvelables
- durée de secours
- coût du stockage

Activités pratiques :

- simulation du dimensionnement du stockage
- optimisation de la pression
- évaluation du rendement du stockage

c) Optimisation des coûts

L'optimisation des coûts réduit les dépenses d'installation et d'exploitation. Les facteurs de coût comprennent :

- coût des équipements
- coût de production de l'hydrogène
- dépenses de maintenance
- pertes d'énergie

Méthodes :

- sélection efficace des composants
- amélioration de l'intégration du système
- utilisation des énergies renouvelables

L'optimisation des coûts améliore la faisabilité du projet, réduit les dépenses d'exploitation et renforce sa durabilité économique.

d) Amélioration de la fiabilité du système

L'optimisation de la fiabilité améliore la stabilité et la continuité de service. Les méthodes comprennent :

- maintenance préventive
- conception redondante
- systèmes de prévision des défauts
- systèmes de surveillance intelligents

Bénéfices pratiques :

- réduction des arrêts
- amélioration de la sécurité de fonctionnement

- allongement de la durée de vie des équipements

2.6. Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les apprenants ont étudié les techniques de simulation et de modélisation utilisées pour analyser et optimiser les systèmes énergétiques hydrogène. Le chapitre a présenté les flux de travail de simulation, les paramètres d'entrée et de sortie, les hypothèses de modélisation, la modélisation des piles à combustible et des électrolyseurs, ainsi que la simulation des systèmes d'hydrogène renouvelable. Les apprenants ont également exploré l'analyse des flux d'énergie, l'évaluation du rendement, l'analyse de la consommation d'hydrogène et la réponse à la charge. Enfin, les techniques d'optimisation énergétique, du stockage d'hydrogène, des coûts et de la fiabilité du système ont été examinées afin de soutenir la conception pratique des systèmes et la prise de décision d'ingénierie.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez l'importance de la simulation dans la conception d'un système hydrogène.
2. Décrivez les principales étapes d'un flux de travail de simulation.
3. Discutez de l'objectif de la modélisation des performances d'une pile à combustible.
4. Expliquez comment la modélisation du fonctionnement d'un électrolyseur soutient l'analyse de la production d'hydrogène.
5. Décrivez le rôle de la simulation des énergies renouvelables dans les systèmes hydrogène.
6. Expliquez l'importance de l'analyse du rendement dans l'évaluation des performances du système.
7. Discutez des méthodes utilisées pour optimiser le stockage d'hydrogène.
8. Expliquez comment la simulation et l'optimisation améliorent la fiabilité des systèmes énergétiques hydrogène.

Logiciels / outils recommandés

- MATLAB/Simulink (avec Simscape pour la modélisation physique) : outil principal pour les simulations dynamiques.
- TRNSYS : pour les simulations transitoires, en particulier l'intégration renouvelables–hydrogène.
- HOMER Pro : pour l'optimisation technico-économique des systèmes hybrides.
- Autres : Python (avec des bibliothèques telles que PyBaMM ou des scripts personnalisés) pour la modélisation sur mesure.

Projets de conception de systèmes hydrogène intégrés et études de cas

3.1. Planification d'un projet énergétique hydrogène

Les projets hydrogène font intervenir plusieurs disciplines de l'ingénierie, notamment électrique, mécanique, chimique, environnementale et systémique. Une planification efficace est essentielle à leur mise en œuvre réussie.

3.1.1. Identification des objectifs du projet

Tout projet hydrogène commence par un objectif clairement défini.

Tableau 3.1 — Objectifs courants des projets hydrogène

Objectif	Exemple
Stockage d'énergie	Stocker l'électricité renouvelable excédentaire
Transport	Alimenter des véhicules à hydrogène
Utilisation industrielle	Remplacer l'hydrogène issu de combustibles fossiles
Alimentation de secours	Fournir une alimentation électrique d'urgence
Soutien au réseau	Stabiliser les fluctuations des énergies renouvelables
Décarbonation	Réduire les émissions de gaz à effet de serre

3.1.2. Définition des exigences techniques

Une fois les objectifs définis, il faut établir les exigences techniques.

a) Exigences de production

- demande d'hydrogène (kg/jour)
- débit de production
- niveau de pureté

b) Exigences de stockage

- capacité de stockage
- pression nominale
- exigences de sécurité

c) Exigences de distribution

- pipeline ou méthode de transport
- capacité de ravitaillement
- systèmes de compression

d) Exigences de l'usage final

- puissance nominale de la pile à combustible

- demande de ravitaillement des véhicules
- exigences des procédés industriels

Exemple — station d'autobus à hydrogène :

- demande d'hydrogène = 500 kg/jour
- pression de stockage = 700 bar
- temps de ravitaillement < 10 minutes par autobus

3.1.3. Planification des ressources

La planification des ressources identifie tous les moyens nécessaires à la mise en œuvre du projet.

a) Ressources humaines

- chefs de projet
- ingénieurs hydrogène
- ingénieurs électriciens
- spécialistes de la sécurité
- personnel de construction

b) Ressources physiques

- électrolyseurs
- systèmes d'énergie renouvelable
- compresseurs
- réservoirs de stockage
- piles à combustible

c) Ressources financières

- dépenses d'investissement (CAPEX)
- dépenses d'exploitation (OPEX)
- budgets de maintenance

d) Ressources réglementaires

- autorisations environnementales
- certifications de sécurité
- approbations de raccordement au réseau

3.1.4. Planification du calendrier du projet

Le calendrier de projet coordonne les activités et les ressources.

Tableau 3.2 — Phases typiques d'un projet

Phase	Activités
Conception conceptuelle	Études de faisabilité
Conception détaillée	Calculs d'ingénierie

Approvisionnement	Achat des équipements
Construction	Installation
Mise en service	Essais et démarrage
Exploitation	Déploiement commercial

Outils de planification courants :

- diagrammes de Gantt
- méthode du chemin critique (CPM)
- méthode PERT (Project Evaluation and Review Technique)
- Primavera P6
- Microsoft Project

3.2. Conception de systèmes d'hydrogène renouvelable

Les systèmes d'hydrogène renouvelable associent une production d'énergie propre à des technologies de production et d'utilisation de l'hydrogène. La figure 3.1 présente une architecture de projet.

3.2.1. Conception d'un projet solaire-hydrogène

La production d'hydrogène alimentée par le solaire est l'une des applications d'hydrogène vert dont le développement est rapide.

Composants du système :

1. champ photovoltaïque (PV)
2. unité de conditionnement de puissance
3. électrolyseur
4. stockage d'hydrogène
5. pile à combustible ou système de distribution

Processus de conception

Étape 1 : déterminer la demande d'hydrogène. Exemple : besoin de 200 kg/jour.

Étape 2 : calculer le besoin en énergie électrique. Consommation d'électrolyse indiquée dans la source : $\approx 50\text{--}55 \text{ kWh/kg H}_2$.

$$\text{Énergie quotidienne} = 200 \times 55 = 11\,000 \text{ kWh/jour}$$

Étape 3 : dimensionner l'installation solaire. Si l'irradiation fournit 5 heures de plein soleil équivalent par jour :

$$\text{Puissance PV requise} = 11\,000 \div 5 = 2,2 \text{ MW}$$

Considérations de conception :

- variations saisonnières
- intermittence solaire

- dimensionnement du stockage
- besoins en superficie

3.2.2. Conception d'un projet éolien-hydrogène

L'énergie éolienne peut permettre une production d'hydrogène avec un facteur de charge élevé.

Composants :

- éoliennes
- convertisseurs de puissance
- électrolyseur
- stockage d'hydrogène
- pile à combustible de secours

Avantages

- production énergétique annuelle élevée
- adaptation au déploiement en mer
- réduction des conflits d'usage des sols

Défis

- vitesses de vent variables
- complexité de l'intégration au réseau
- besoins de maintenance plus élevés

3.2.3. Configuration d'un système renouvelable hybride

Les systèmes hybrides associent plusieurs sources renouvelables.

a) Solaire + éolien + électrolyseur

- fiabilité améliorée
- meilleur taux d'utilisation de l'électrolyseur
- réduction des besoins de stockage

b) Solaire + batterie + hydrogène

- stockage à court terme par batteries
- stockage à long terme par hydrogène

Renouvelables → Batterie → Électrolyseur → Stockage H₂ → Pile à combustible → Charge

3.2.4. Systèmes raccordés au réseau et autonomes

1) Systèmes raccordés au réseau

- échange d'électricité avec le réseau public
- fiabilité améliorée
- besoins de stockage plus faibles

Avantages :

- risque de projet réduit
- fonctionnement plus continu de l'électrolyseur

2) Systèmes autonomes

- fonctionnement entièrement autonome
- applications en zones isolées
- forte dépendance au stockage

Applications :

- îles
- exploitations minières
- communautés isolées
- installations militaires

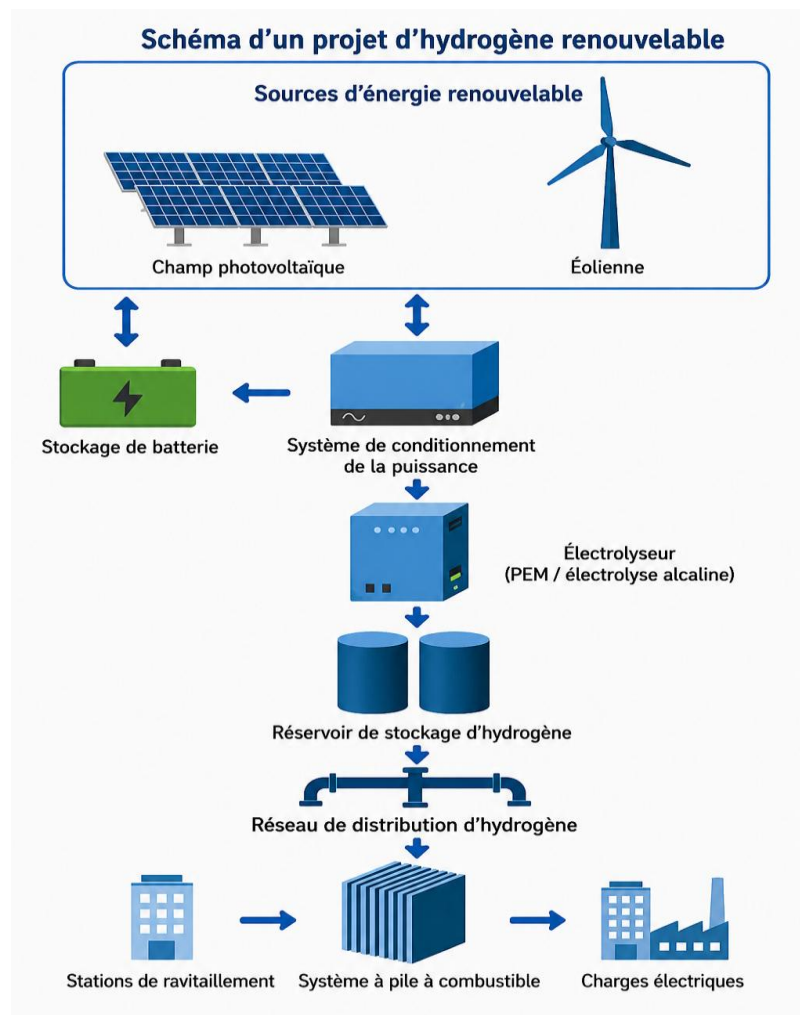


Figure 3.1 — Architecture d'un projet d'hydrogène renouvelable

3.3. Projets de systèmes de transport à hydrogène

Le transport est l'un des secteurs de croissance importants pour le déploiement de l'hydrogène.

3.3.1. Systèmes de véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)

Les véhicules électriques à pile à combustible convertissent l'hydrogène en électricité à bord. Leurs principaux composants sont :

- réservoir de stockage d'hydrogène
- empilement de piles à combustible
- système de batterie
- moteur électrique
- électronique de puissance

Principe de fonctionnement :

Hydrogène + oxygène → pile à combustible → électricité → entraînement du moteur → mouvement du véhicule

Avantages

- ravitaillement rapide
- grande autonomie
- aucune émission à l'échappement

3.3.2. Stations de ravitaillement en hydrogène

L'infrastructure de ravitaillement en hydrogène est essentielle au déploiement de la mobilité. La figure 3.2 présente les composants fonctionnels suivants :

Production d'hydrogène :

- électrolyse sur site
- hydrogène livré

Système de compression :

- compresseurs multi-étagés
- régulation de pression

Système de stockage :

- réservoirs de stockage haute pression

Système de distribution :

- pistolets/raccords de ravitaillement
- équipements de comptage

Système de sécurité :

- détection des fuites
- arrêt d'urgence
- protection incendie

Système de station de ravitaillement en hydrogène

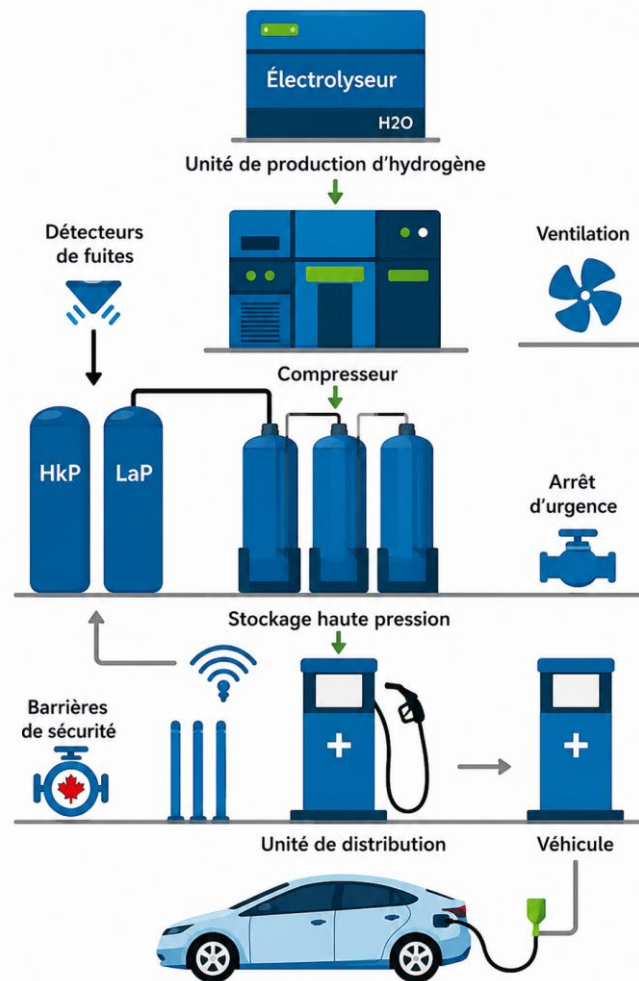


Figure 3.2 — Système de station de ravitaillement en hydrogène

3.3.3. Applications de mobilité hydrogène

- Véhicules particuliers : par exemple Toyota Mirai et Hyundai NEXO.
- Transports publics : autobus à pile à combustible et navettes.
- Transport lourd : camions, fret et équipements portuaires.
- Transport ferroviaire : trains à hydrogène.
- Applications maritimes : ferries à hydrogène et navires à pile à combustible.
- Applications aéronautiques : projets de développement d'aéronefs à hydrogène.

3.3.4. Systèmes de gestion énergétique des flottes

La gestion de flotte optimise la consommation d'hydrogène et l'efficacité opérationnelle. Ses fonctions principales comprennent :

- surveillance des véhicules
- suivi du carburant
- planification du ravitaillement
- maintenance prédictive

Tableau 3.3 — Indicateurs de performance

KPI	Description
Consommation de carburant	kg H ₂ /km
Disponibilité	Temps de fonctionnement opérationnel
Efficacité économique	Coût/km
Réduction des émissions	CO ₂ évité

3.4. Études de cas de systèmes hydrogène industriels

Les applications industrielles représentent actuellement le principal marché de l'hydrogène à l'échelle mondiale.

3.4.1. Hydrogène dans les industries manufacturières

a) Production d'acier : l'hydrogène remplace le coke dans les procédés de réduction directe.

- réduction significative du CO₂
- amélioration de la durabilité

b) Industrie chimique : l'hydrogène est utilisé pour :

- la production d'ammoniac
- la synthèse du méthanol
- les opérations de raffinage

c) Industries du verre et du ciment : l'hydrogène contribue à réduire les émissions liées à la combustion.

3.4.2. Applications d'alimentation de secours

Les piles à combustible peuvent fournir une alimentation de secours très fiable. Les domaines d'application courants comprennent :

- centres de données
- hôpitaux
- télécommunications
- aéroports

Avantages

- temps de réponse rapide
- faibles émissions
- faible niveau sonore

Exemple de cas : tour de télécommunications alimentée par solaire PV, stockage d'hydrogène et pile à combustible de secours. Résultat : fonctionnement continu pendant les coupures du réseau.

3.4.3. Systèmes de micro-réseaux hydrogène

Les micro-réseaux hydrogène intègrent la production renouvelable, le stockage et l'alimentation de secours. Les principaux composants sont le solaire PV, les éoliennes, le stockage sur batteries, l'électrolyseur, le stockage d'hydrogène et la pile à combustible.

Stratégie de fonctionnement :

- Excédent d'énergie renouvelable : utilisé pour produire de l'hydrogène.
- Faible production renouvelable : la pile à combustible produit de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

Avantages

- résilience renforcée
- stockage d'énergie de longue durée
- indépendance énergétique

3.4.4. Projets de décarbonation industrielle

L'hydrogène est de plus en plus déployé pour réduire les émissions de carbone industrielles. La voie de décarbonation décrite dans la source est :

Électricité renouvelable → Électrolyse → Hydrogène vert → Procédé industriel → Réduction des émissions de carbone

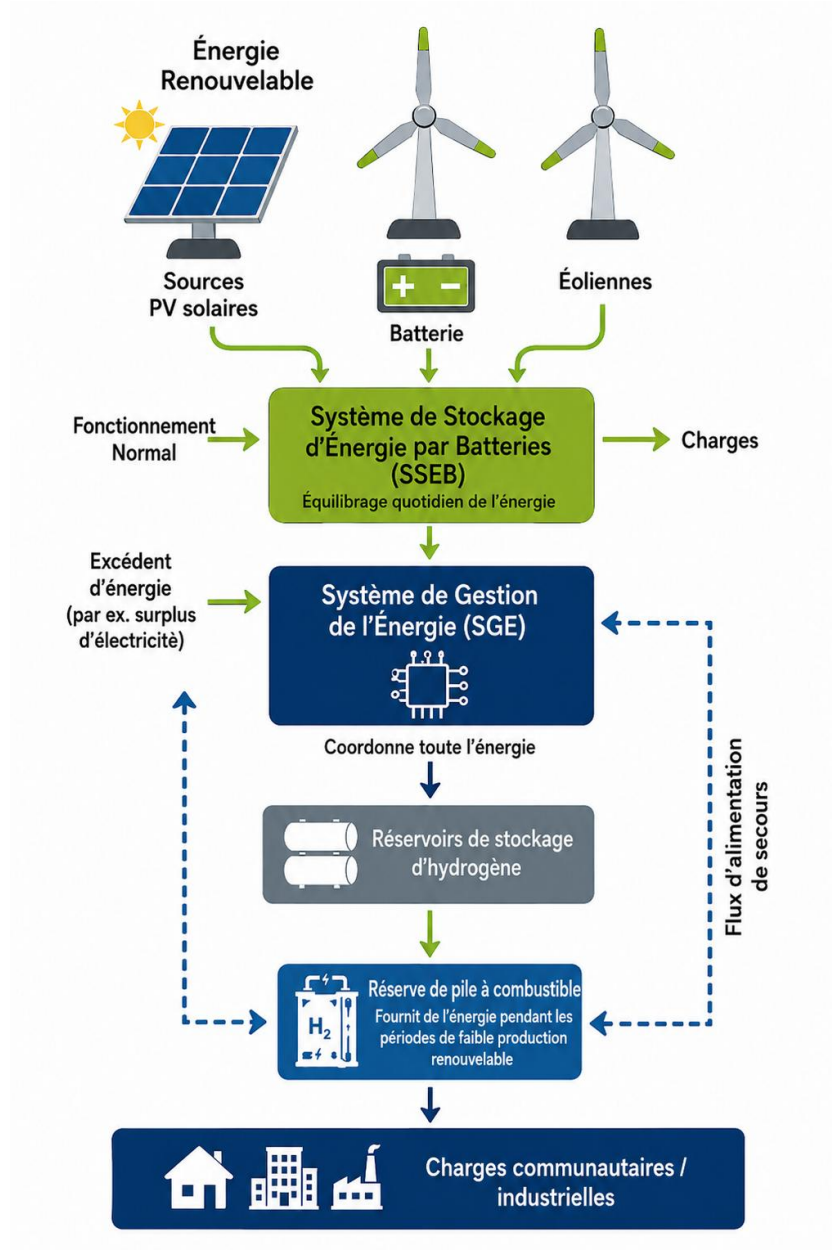


Figure 3.3 — Étude de cas d'un micro-réseau hydrogène

Exemples d'industries : acier, chimie, engrais, mines et ciment.

Facteurs de réussite :

- disponibilité des énergies renouvelables
- compétitivité économique
- incitations publiques
- maturité des infrastructures

3.5. Documentation technique et rapports

Une documentation professionnelle garantit la qualité du projet, la conformité réglementaire et une communication efficace avec les parties prenantes.

3.5.1. Dessins et schémas d'ingénierie

Les dessins d'ingénierie communiquent les détails de conception du système. Les documents courants sont :

- Diagramme de flux de procédé (PFD) : présente les principaux équipements et les flux du procédé.
- Schéma de tuyauterie et d'instrumentation (P&ID) : présente les vannes, capteurs et systèmes de commande.
- Schéma électrique unifilaire : présente les connexions électriques et les systèmes de protection.
- Plans d'implantation : présentent l'emplacement des équipements et l'organisation du site.

Bonnes pratiques :

- utiliser des symboles d'ingénierie normalisés
- assurer la gestion des versions
- respecter les normes applicables

3.5.2. Préparation d'un rapport technique

Un rapport technique documente les conclusions et recommandations d'un projet. Structure type :

1. Résumé exécutif
2. Introduction
3. Objectifs du projet
4. Méthodologie
5. Calculs de conception
6. Résultats
7. Analyse économique
8. Évaluation des risques
9. Conclusions
10. Références

Lignes directrices de rédaction :

- langage clair et concis
- conclusions fondées sur des éléments probants
- mise en forme professionnelle
- terminologie technique précise

3.5.3. Documentation des spécifications du système

Les spécifications définissent les exigences de performance des équipements et du système. Elles contiennent généralement :

- caractéristiques nominales des équipements
- conditions de fonctionnement
- exigences de sécurité
- garanties de performance
- exigences de maintenance

Exemple de spécification — électrolyseur :

- capacité : 1 MW
- rendement : 70 %
- pureté : 99,999 %
- pression : 30 bar

3.5.4. Techniques de présentation de projet

Une présentation efficace communique les informations techniques aux parties prenantes.

Structure de présentation :

1. Problématique
2. Objectifs du projet
3. Conception du système
4. Analyse technique
5. Évaluation économique
6. Bénéfices environnementaux
7. Conclusions

Bonnes pratiques :

- utiliser des schémas et supports visuels
- se concentrer sur les principaux résultats
- quantifier les bénéfices
- traiter les risques et les mesures d'atténuation

3.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a intégré les concepts avancés de l'ingénierie hydrogène à la mise en œuvre pratique de projets et à des applications réelles. Les apprenants ont étudié les méthodologies de planification de projet, la conception de systèmes d'hydrogène renouvelable, les infrastructures de transport, les applications industrielles, le déploiement de micro-réseaux et la documentation professionnelle d'ingénierie. Ces compétences permettent aux ingénieurs et professionnels de l'énergie de concevoir, évaluer, communiquer et gérer des projets énergétiques hydrogène complexes dans des environnements commerciaux et industriels.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez la planification d'un projet énergétique hydrogène et expliquez pourquoi elle est importante pour la réussite de sa mise en œuvre.
2. Identifiez et expliquez brièvement les quatre grandes étapes de la planification d'un projet énergétique hydrogène.
3. Différenciez un système hydrogène raccordé au réseau d'un système autonome. Donnez un exemple d'application pour chacun.

4. Une installation doit produire 250 kg d'hydrogène par jour. Si l'électrolyseur consomme 52 kWh par kg d'hydrogène, calculez la demande quotidienne d'électricité.
5. Expliquez comment un système hybride solaire-éolien pour la production d'hydrogène peut améliorer la fiabilité par rapport à un système exclusivement solaire.
6. Élaborez l'architecture conceptuelle d'un système solaire-hydrogène montrant les principaux composants depuis la production d'électricité jusqu'à l'usage final de l'énergie.
7. Discutez des principales exigences techniques et de sécurité à prendre en compte lors de la conception d'une station de ravitaillement en hydrogène.
8. Une communauté isolée subit de fréquentes coupures d'électricité. Proposez une solution de micro-réseau hydrogène et identifiez ses principaux composants et sa stratégie de fonctionnement.
9. Évaluez les avantages et les difficultés de l'utilisation de piles à combustible comme alimentation de secours dans les hôpitaux et les centres de données.
10. Les secteurs industriels adoptent de plus en plus l'hydrogène pour réduire leurs émissions de carbone. Expliquez comment l'hydrogène peut soutenir la décarbonation industrielle et citez deux industries où son impact pourrait être important.

Innovation, optimisation et futures applications des systèmes hydrogène

Les technologies de l'hydrogène évoluent rapidement et devraient jouer un rôle central dans la transition énergétique mondiale. Ce chapitre examine les technologies hydrogène avancées, les systèmes intelligents de gestion de l'énergie, les méthodes d'optimisation, les applications durables de l'hydrogène, les stratégies d'innovation et les tendances émergentes. Les apprenants développeront leur capacité à évaluer les systèmes hydrogène de nouvelle génération et à proposer des solutions d'ingénierie innovantes améliorant les performances, la durabilité et la viabilité économique.

En tant que chapitre final du cours avancé sur les systèmes énergétiques hydrogène, l'accent est mis sur l'esprit critique, la prospective technologique, l'optimisation des systèmes et les futures stratégies de déploiement de l'hydrogène.

Acquis d'apprentissage

- Expliquer les technologies hydrogène avancées et émergentes.
- Appliquer des techniques d'optimisation afin d'améliorer les performances des systèmes hydrogène.
- Évaluer des applications durables de l'hydrogène.
- Développer des solutions d'ingénierie innovantes pour répondre aux défis de l'hydrogène.
- Évaluer les possibilités futures de l'économie de l'hydrogène.
- Concevoir des systèmes énergétiques hydrogène conceptuels de nouvelle génération.

4.1. Technologies hydrogène avancées

Les technologies de l'hydrogène évoluent au-delà des systèmes conventionnels de production et de piles à combustible vers des solutions énergétiques intelligentes, automatisées et fortement intégrées. La figure 4.1 illustre un futur système énergétique hydrogène intelligent comprenant des SER, une plateforme de commande par IA, un électrolyseur, le stockage d'hydrogène, une pile à combustible, un réseau intelligent et des charges résidentielles, industrielles et de transport.

4.1.1. Systèmes hydrogène intelligents

Les systèmes hydrogène intelligents utilisent des capteurs, des réseaux de communication, l'analyse des données et des commandes automatisées afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle.

Caractéristiques principales :

- surveillance en temps réel
- commande automatisée
- maintenance prédictive
- prévision de la demande

- auto-optimisation

Applications

- stations intelligentes de ravitaillement en hydrogène
- installations d'hydrogène renouvelable
- micro-réseaux hydrogène
- installations hydrogène industrielles

Bénéfices

- rendement amélioré
- temps d'arrêt réduit
- sécurité renforcée
- coûts d'exploitation réduits

4.1.2. Gestion de l'hydrogène assistée par intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) devient un outil important dans l'exploitation des systèmes hydrogène.

a) Optimisation de la production : l'IA prévoit la disponibilité des renouvelables, les prix de l'électricité et la demande d'hydrogène, puis ajuste le fonctionnement de l'électrolyseur en conséquence.

b) Maintenance prédictive : les algorithmes d'apprentissage automatique analysent la température, la pression, les vibrations et les fluctuations de tension afin d'identifier des défaillances potentielles avant qu'elles ne se produisent.

c) Prévision de la demande : l'IA prévoit la demande de ravitaillement des véhicules, la consommation industrielle d'hydrogène et les besoins de soutien au réseau.

Exemple : une installation hydrogène pilotée par IA peut augmenter la production pendant les périodes où le prix de l'électricité est faible et la réduire pendant les périodes de prix élevé.

4.1.3. Technologies avancées de piles à combustible

Les futures piles à combustible deviennent plus efficaces, plus durables et plus économiques.

a) Piles à combustible PEM haute température — avantages :

- rendement amélioré
- meilleure récupération de chaleur
- besoins de refroidissement réduits

b) Piles à combustible à oxyde solide (SOFC) — avantages :

- rendement électrique élevé
- flexibilité vis-à-vis du combustible
- possibilité de cogénération

c) Piles à combustible réversibles — modes de fonctionnement :

- mode électrolyseur

- mode pile à combustible

Bénéfices :

- réduction du coût des équipements
- flexibilité accrue du système

4.1.4. Systèmes de surveillance numérique

Les installations hydrogène modernes reposent largement sur les technologies numériques. Leurs composants peuvent comprendre :

- capteurs IoT
- systèmes SCADA
- plateformes cloud
- jumeaux numériques
- systèmes de surveillance à distance

Technologie du jumeau numérique : un jumeau numérique est un modèle virtuel d'un système hydrogène physique. Ses applications comprennent :

- simulation des performances
- détection des défauts
- planification de la maintenance
- formation des opérateurs

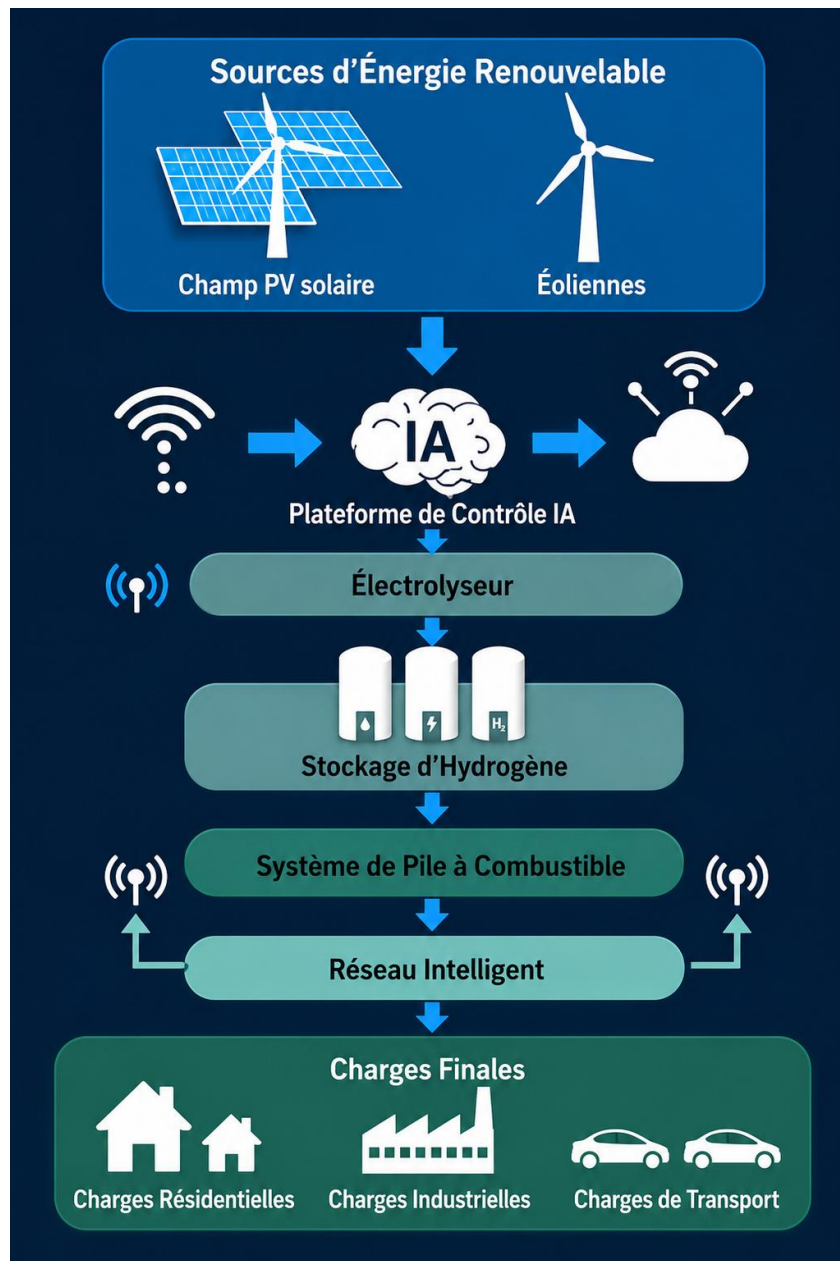


Figure 4.1 — Futur système énergétique hydrogène intelligent

4.2. Stratégies d'optimisation des systèmes hydrogène

L'optimisation cherche à maximiser les performances tout en minimisant les coûts et l'impact environnemental. La figure 4.2 présente un cadre d'optimisation énergétique de l'hydrogène.

4.2.1. Amélioration du rendement énergétique

Principales pertes de rendement :

- pertes d'électrolyse
- pertes de compression
- pertes de stockage
- pertes des piles à combustible

Stratégies d'amélioration :

- récupération de chaleur fatale

- électrolyseurs à haut rendement
- catalyseurs de pile à combustible améliorés
- commande opérationnelle intelligente

Exemple : améliorer le rendement d'un électrolyseur de 65 % à 75 % réduit sensiblement la consommation d'électricité par kilogramme d'hydrogène produit.

4.2.2. Techniques de réduction des coûts

L'économie de l'hydrogène demeure un défi important.

- a) Changement d'échelle de la production :** les systèmes de plus grande taille réduisent les coûts unitaires.
- b) Améliorations technologiques :** meilleurs catalyseurs, membranes améliorées et procédés de fabrication avancés.
- c) Intégration des énergies renouvelables :** l'utilisation d'électricité solaire et éolienne à faible coût réduit le coût de production de l'hydrogène.
- d) Automatisation :** elle réduit les dépenses de main-d'œuvre et de maintenance.

4.2.3. Amélioration de la fiabilité

Des systèmes fiables assurent la continuité du fonctionnement. Les stratégies comprennent :

- composants redondants
- maintenance prédictive
- surveillance de l'état
- systèmes de sécurité robustes

Tableau 4.3 — Indicateurs de fiabilité

Indicateur	Description
Disponibilité	Temps de fonctionnement (%)
MTBF	Temps moyen entre défaillances
MTTR	Temps moyen de réparation
Indice de fiabilité	Probabilité de fonctionnement réussi

4.2.4. Gestion intelligente de l'énergie

La gestion intelligente de l'énergie équilibre la production, le stockage et la consommation. Elle est importante pour :

- prévision des charges
- planification énergétique
- effacement / réponse à la demande
- gestion des stocks d'hydrogène

Objectif d'optimisation — minimiser :

- le coût

- les pertes d'énergie
- les émissions de carbone

tout en maximisant :

- la fiabilité
- le rendement
- les revenus

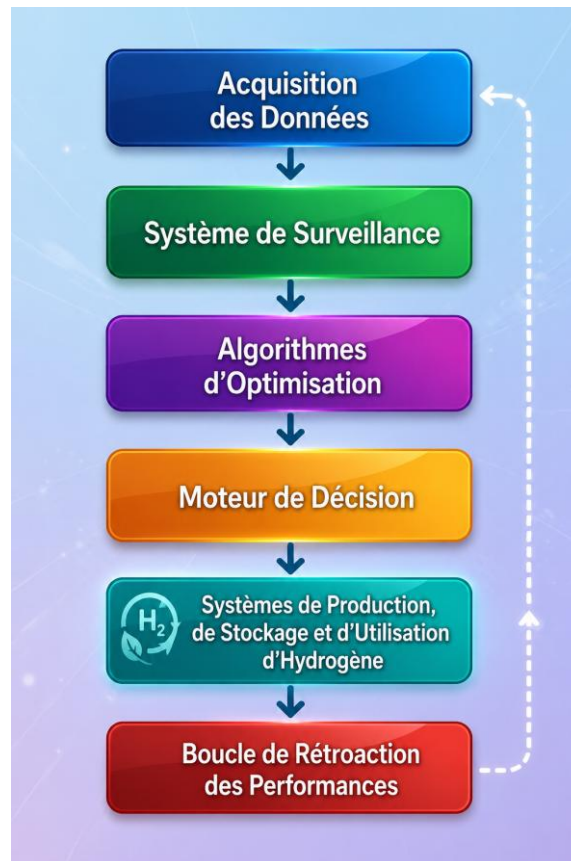


Figure 4.2 — Cadre d'optimisation énergétique de l'hydrogène

4.3. Applications durables de l'hydrogène

4.3.1. Production d'hydrogène vert

L'hydrogène vert est produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable. La source lui associe les bénéfices de durabilité suivants :

- zéro émission de carbone
- réduction de la dépendance aux combustibles fossiles
- renforcement de la sécurité énergétique

Facteurs mondiaux de développement :

- politiques climatiques
- engagements vers la neutralité carbone
- expansion des énergies renouvelables

4.3.2. Développement de l'économie de l'hydrogène

L'économie de l'hydrogène représente un futur système énergétique dans lequel l'hydrogène devient un vecteur énergétique majeur.

Production → Stockage → Transport → Distribution → Usage final

Secteurs clés :

- industrie
- transport
- bâtiments
- production d'électricité

4.3.3. Systèmes de stockage des énergies renouvelables

L'hydrogène permet un stockage d'énergie de longue durée et peut également assurer un stockage saisonnier des énergies renouvelables.

Tableau 4.4 — Comparaison des durées de stockage

Technologie	Durée de stockage
Batteries	Heures
Pompage-turbinage	Heures à jours
Hydrogène	Jours à mois

4.3.4. Solutions de transport durable

Applications :

- véhicules à pile à combustible
- autobus à hydrogène
- camions à hydrogène
- trains
- navires
- aéronefs

Potentiel futur : l'hydrogène devrait jouer un rôle important dans les secteurs du transport difficiles à électrifier directement.

4.4. Innovation et résolution de problèmes d'ingénierie

L'innovation stimule le progrès des technologies de l'hydrogène.

4.4.1. Approches créatives d'ingénierie

Les ingénieurs doivent développer des solutions visant :

- la réduction des coûts
- l'amélioration de la sécurité

- l'expansion des infrastructures
- l'amélioration du rendement du système

Sources d'innovation :

- technologies émergentes
- collaboration interdisciplinaire
- conception centrée sur l'utilisateur
- objectifs de durabilité

4.4.2. Techniques de design thinking

Cinq étapes :

1. Comprendre / empathiser
2. Définir
3. Idéer
4. Prototyper
5. Tester

Défi : réduire le temps de ravitaillement en hydrogène. Les solutions possibles comprennent des systèmes de distribution avancés, une gestion intelligente de la pression et une commande du ravitaillement assistée par IA.

4.4.3. Concepts de recherche et développement

Objectifs de R&D :

- progrès technologique
- amélioration des performances
- réduction des coûts
- adoption par le marché

Domaines de recherche :

- catalyseurs avancés
- nouveaux matériaux de stockage
- électrolyseurs à haut rendement
- systèmes de combustion de l'hydrogène

4.4.4. Développement de prototypes

Le développement de prototypes transforme les concepts en systèmes pratiques. Le processus décrit dans la source est :

*Concept → Conception → Simulation → Prototype → Essais → Amélioration →
Commercialisation*

4.5. Tendances futures des systèmes énergétiques hydrogène

4.5.1. Infrastructure hydrogène mondiale

Développements attendus :

- commerce international de l'hydrogène
- réseaux de pipelines d'hydrogène
- grands pôles hydrogène mondiaux
- terminaux d'exportation et d'importation

4.5.2. Villes hydrogène intelligentes

Les futures villes intelligentes pourront intégrer :

- systèmes d'énergie renouvelable
- installations de production d'hydrogène
- transport à pile à combustible
- réseaux électriques intelligents
- micro-réseaux hydrogène

Bénéfices

- faibles émissions de carbone
- résilience énergétique améliorée
- développement urbain durable

4.5.3. Expansion de l'hydrogène industriel

Le déploiement de l'hydrogène devrait augmenter dans la production d'acier, l'industrie chimique, les mines, la production de ciment et la logistique maritime.

4.5.4. Technologies futures de transition énergétique

Technologies émergentes :

- aviation propulsée par l'hydrogène
- turbines à gaz alimentées à l'hydrogène
- photosynthèse artificielle
- production d'hydrogène en mer
- technologies Power-to-X
- carburants synthétiques à base d'hydrogène

La figure 4.3 illustre un écosystème futur complet comprenant les énergies renouvelables, la production et le stockage d'hydrogène, son transport, les usages industriels et de mobilité, la production d'électricité, les villes intelligentes et les communautés.

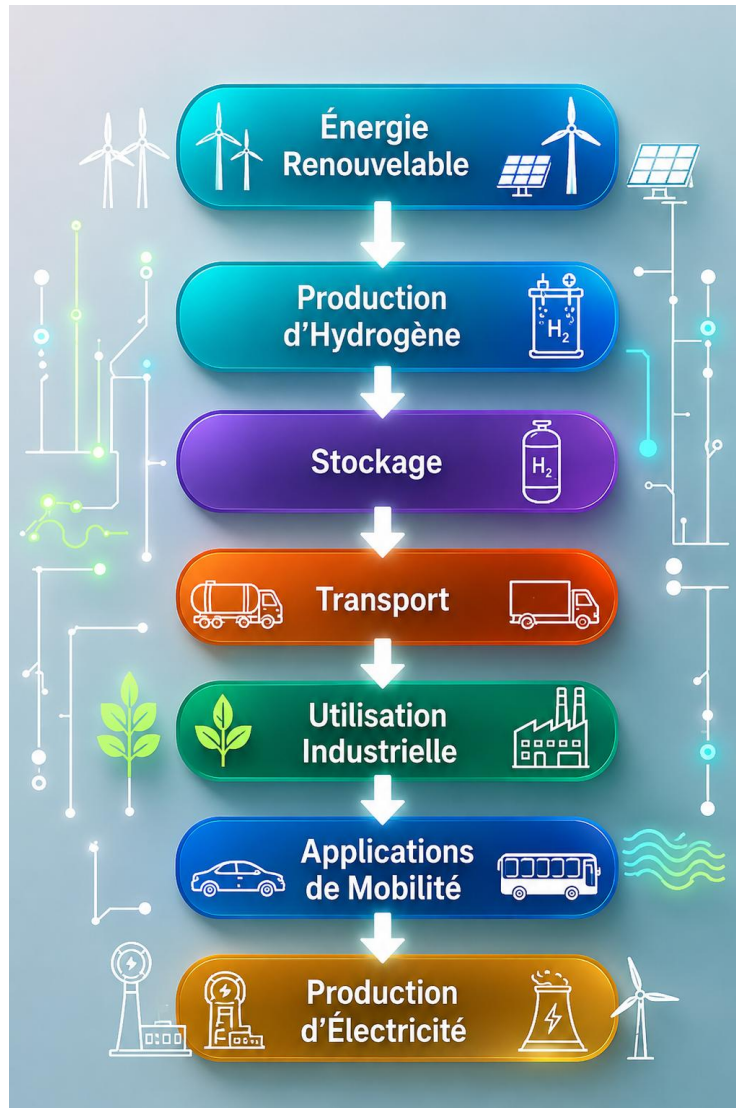


Figure 4.3 — Écosystème futur de l'économie de l'hydrogène

Activités pratiques et projets

Activité 1 — Conception conceptuelle d'un système hydrogène Développer une solution énergétique hydrogène conceptuelle pour une communauté ou une industrie sélectionnée.

Activité 2 — Simulation d'une pile à combustible et d'un électrolyseur Utiliser un logiciel de simulation pour évaluer les performances du système.

Activité 3 — Modélisation d'un système hydrogène renouvelable hybride Modéliser des systèmes solaire-éolien-électrolyseur et évaluer les flux d'énergie.

Activité 4 — Optimisation du stockage d'hydrogène Déterminer la capacité de stockage optimale pour des scénarios de demande définis.

Activité 5 — Analyse d'une étude de cas industrielle Évaluer des projets réels de déploiement de l'hydrogène et les enseignements qui en sont tirés.

Activité 6 — Projet de dépannage d'un système hydrogène Diagnostiquer et résoudre des problèmes de fonctionnement dans des systèmes hydrogène intégrés.

Activité 7 — Rapport et présentation d'ingénierie Préparer un rapport technique professionnel et une présentation destinée aux parties prenantes.

Activité 8 — Projet de synthèse de conception d'un système énergétique hydrogène intégré Concevoir un système complet comprenant la production renouvelable, la production d'hydrogène, le stockage, le transport ou l'utilisation industrielle, les systèmes de sécurité, l'évaluation économique et l'évaluation de la durabilité.

4.6. Résumé

Ce chapitre final place les apprenants au-delà de l'exploitation et de la conception des systèmes hydrogène, vers l'innovation, l'optimisation et le leadership stratégique. En intégrant les technologies avancées, l'intelligence artificielle, la numérisation, les principes de durabilité et les concepts futurs de transition énergétique, les apprenants acquièrent les compétences nécessaires pour contribuer aux systèmes énergétiques hydrogène de nouvelle génération, aux initiatives de décarbonation industrielle, aux infrastructures énergétiques intelligentes et à l'économie mondiale émergente de l'hydrogène.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez un système hydrogène intelligent et décrivez deux caractéristiques qui le distinguent d'un système hydrogène conventionnel.
2. Expliquez le rôle de l'intelligence artificielle (IA) dans la gestion des systèmes énergétiques hydrogène.
3. Qu'est-ce qu'un jumeau numérique et comment peut-il améliorer l'exploitation et la maintenance des installations hydrogène ?
4. Identifiez trois domaines d'une installation de production d'hydrogène dans lesquels des techniques d'optimisation peuvent améliorer le rendement global du système.
5. Discutez des avantages des technologies avancées de piles à combustible par rapport aux systèmes conventionnels.
6. Une installation de production d'hydrogène subit des coûts d'exploitation élevés en raison de fluctuations du prix de l'électricité. Expliquez comment une gestion énergétique assistée par IA pourrait réduire les coûts de production.
7. Élaborez un cadre conceptuel pour une ville hydrogène intelligente intégrant la production d'énergie renouvelable, la production et le stockage d'hydrogène, le transport et des systèmes numériques de gestion de l'énergie.
8. Comparez les systèmes de stockage d'énergie par hydrogène et les systèmes de stockage sur batteries en termes de durée de stockage, d'évolutivité et d'adéquation aux applications.
9. Proposez une solution d'ingénierie innovante susceptible d'améliorer le rendement, la sécurité ou la viabilité économique des futurs systèmes énergétiques hydrogène.
10. L'hydrogène devrait jouer un rôle important dans l'atteinte des objectifs mondiaux de neutralité carbone. Discutez des opportunités et des défis liés à l'établissement d'une économie de l'hydrogène à grande échelle d'ici 2050.