

MÉTHODES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE, RISQUES ASSOCIÉS ET PRÉVENTION

Cet article revient en détail sur les technologies de production d'hydrogène, sur les risques d'incendie et d'explosion qui y sont associés et sur les démarches et moyens de prévention mis en place pour les combattre à la source.

CYRIL GEHL
société Fike

La production mondiale d'hydrogène a presque doublé ces dernières années, passant de 55 Mt en 2005 à 97 Mt en 2024 ; cependant, seul 1 % de cette production (hydrogène bleu et vert) est considéré « à faibles émissions » de gaz à effet de serre¹.

Afin de mieux comprendre les différents types de production d'hydrogène et leurs divers niveaux d'émissions, ceux-ci sont généralement regroupés en catégories de couleur, chacune étant définie par la source d'énergie utilisée, la technologie de production et l'empreinte carbone (Cf. Figure 1). Par exemple, les couleurs les plus foncées, noir et marron, représentent les productions d'hydrogène les plus polluantes, tandis que les couleurs les plus claires, bleu et vert, représentent les moins émissives.

Chacune de ces méthodes de production présente des risques spécifiques, notamment ceux liés à la pression, aux incendies et aux explosions. L'objectif de cet article est d'identifier ces risques et de mettre en évidence les meilleures pratiques pour les prévenir.

Risques liés à la production d'hydrogène noir et marron et moyens de prévention et de protection

- Source de combustible : charbons noir et brun (lignite).
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 30 %.
- Technologie : gazéification – le charbon réagit avec la vapeur d'eau et l'oxygène à haute température.

Plusieurs étapes du processus de gazéification peuvent présenter des risques d'explosion.

Étape 1 : broyage du charbon

Le broyage du charbon (Cf. Figure 2) provoque la mise en suspension de poussières combus-

tibles dans le broyeur et forme une atmosphère explosive (Atex). De plus, la présence de sources d'inflammation dans le broyeur ne peut être totalement exclue par des mesures techniques ou organisationnelles.

Les mesures suivantes permettent de prévenir les risques pour les travailleurs et de protéger les installations :

- Caractérisation de la poussière à l'aide de tests en laboratoire (Cf. pp. 28-37). En effet, les propriétés d'inflammabilité et d'explosivité peuvent varier en fonction du type de charbon, de la taille des particules ou de la teneur en humidité. Cette étape est particulièrement essentielle afin

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

NOIR

Gazéification du charbon

MARRON

Gazéification du lignite (charbon brun)

GRIS

Reformage du gaz naturel

NOIR

Reformage du gaz naturel avec CSC*

VERTE

Électrolyse

*Captage et stockage du carbone

↑ FIGURE 1 Exemple de classification des modes de production de l'hydrogène.

de définir correctement les mesures de prévention et les équipements de protection.

- Évaluation des risques tenant compte des spécificités du processus. Elle permet d'identifier les zones à risques et de définir les mesures de prévention des explosions, telles que les actions sur le contrôle des émissions de poussières, les sources d'inflammation, les paramètres de contrôle, la maintenance et l'entretien des équipements, le nettoyage des dépôts.
- Définition de mesures de protection pour le broyeur. Elles consistent à prévoir des dispositifs devant remplir deux fonctions : limiter l'accumulation de pression dans l'enceinte et empêcher l'explosion de se propager aux équipements connexes. Les systèmes de suppression des explosions (au moyen d'agents extincteurs) sont généralement préférés aux événements d'explosion « passifs » en raison des niveaux élevés de vibrations associés aux broyeurs à charbon. Ces systèmes fonctionnent comme suit : quelques centaines de millisecondes après avoir détecté une augmentation anormale de la pression liée à l'inflammation de l'Atex, un agent extincteur est injecté dans l'enceinte. Cela arrête la réaction de combustion et limite par conséquent l'augmentation de pression. L'explosion doit également être contenue dans le broyeur, afin d'éviter sa propagation aux autres équipements, tels que les cyclones ou les dépoussiéreurs. Les dispositifs d'isolation chimique recommandés sont installés sur l'entrée d'air chaud, l'entrée des briquettes de charbon et la sortie des poussières de charbon. Ils fonctionnent de manière similaire aux systèmes de suppression des explosions en créant une barrière inerte que les flammes ne peuvent pas franchir.

Étape 2 : Gazéification

Après broyage, le charbon est soumis à un processus de « gazéification » afin de créer un gaz de synthèse contenant de l'hydrogène. Bien que plusieurs étapes du processus de gazéification soient considérées comme dangereuses, cette section se concentre uniquement sur l'oxydation, qui est considérée comme la phase la plus critique. De même, la fragilisation des matériaux par l'hydrogène doit être prise en compte sur l'ensemble de l'installation (phénomène détaillé ci-après). Après séchage et pyrolyse du charbon, une quantité contrôlée d'oxygène est injectée. Le charbon subit une combustion partielle, générant de la chaleur, des oxydes de carbone et de l'eau. L'injection d'oxygène provoque la formation d'une Atex. Outre les systèmes de protection contre les explosions, des mesures techniques réduisent le risque de combustion et se concentrent principalement sur le contrôle des processus, telles que :



© Flickr

- surveiller les températures afin de maintenir le réacteur dans les limites de fonctionnement spécifiées ;
- ventiler afin de réduire la concentration en gaz inflammables ;
- inerte le réacteur au démarrage et à l'arrêt ;
- arrêter le processus dès la détection d'une anomalie, telle qu'une température de surface élevée ou une étincelle.

Le choix et l'ampleur de ces mesures doivent être déterminés par une évaluation des risques liée au processus.

↑ **FIGURE 2**
Broyeur à charbon.

Risques liés à la production d'hydrogène gris et bleu et moyens de prévention et de protection

- Source de combustible : gaz naturel.
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 60 % (gris), 2 % à 3 % (bleu).
- Technologie : reformage du méthane à la vapeur (en anglais SMR : *Steam methane refining*) ; une chaleur intense est utilisée pour transformer le méthane en hydrogène.

Le vaporeformage du méthane (SMR) requiert un four de reformage à la vapeur, dans lequel le gaz naturel et la vapeur passent à travers des dizaines de tubes remplis de catalyseurs à des températures pouvant atteindre 1 100 °C pour produire de l'hydrogène, appelé hydrogène gris. Une forme encore plus éco-efficace de ce processus permet la production d'hydrogène bleu. Elle utilise, une fois l'hydrogène produit, une technologie de capture et de stockage du carbone (en anglais CSC : *Carbon storage and capture*) pour réutiliser le CO₂ provenant du vaporeformage dans un autre processus





FIGURE 3 →
Disque de rupture
en amont
d'une PRV.

avec la vapeur d'eau et produisant de nouveau de l'hydrogène et du CO₂.

Les tubes catalyseurs et les collecteurs fonctionnent sous une pression généralement comprise entre 20 bar et 40 bar, et exigent donc un dispositif de décompression qui permet de limiter l'accumulation excessive de pression dans le système et l'empêche d'éclater. En raison du nombre important de tubes et de leur diamètre souvent réduit, des soupapes de décompression (en anglais PRV : *Pressure reducing valve*) sont installées au niveau du collecteur (en sortie) ou du manifold (en entrée) afin de couvrir l'ensemble du faisceau de tubes. Des disques de rupture (Cf. Figure 3) peuvent également être utilisés en amont des PRV pour les raisons suivantes :

- contrôle des émissions dans l'environnement de travail : des pressions légèrement supérieures à la normale peuvent entraîner des fuites indésirables au niveau de la soupape. Un disque de rupture en amont assure une étanchéité parfaite tant qu'il n'y a pas de nécessité de libérer une surpression dangereuse pour l'installation ;
- optimisation des coûts et protection des équipements de sécurité : le processus de reformage du méthane à la vapeur peut nécessiter l'installation de PRV fabriquées avec des matériaux coûteux, tels que des aciers fortement alliés, afin de les

protéger contre la corrosion et la fragilisation par l'hydrogène. Un disque de rupture en amont isole la vanne du fluide, protégeant ainsi les PRV coûteuses ou permettant l'utilisation de matériaux plus courants dans leur fabrication ;

- vérifications et contrôles : les vannes doivent être régulièrement démontées et testées afin de s'assurer qu'elles fonctionnent correctement et que les codes et les normes sont respectés, ce qui entraîne des temps d'arrêt indésirables. Certains types de disques de rupture permettent de réaliser des tests en cours de fonctionnement en pressurant la cavité entre les deux dispositifs.

La fragilisation par l'hydrogène doit également être prise en compte, car elle peut avoir un impact considérable sur les composants critiques. La fragilisation par l'hydrogène rend les métaux cassants en raison de l'introduction et de la diffusion d'hydrogène dans le matériau. Ce phénomène entraîne une réduction de la ductilité et une diminution de la capacité de charge en dessous de la résistance à la rupture ou de la limite d'élasticité prévue des matériaux qui y sont sensibles.

Des fissures peuvent alors apparaître sur un objet fragilisé sous l'effet de contraintes résiduelles, de service ou générées par des opérations de fabrication telles que le formage et le soudage.

Ces conditions peuvent entraîner des dommages importants et, à terme, la défaillance de composants critiques du processus. Il est donc essentiel d'éviter la fragilisation par l'hydrogène.

Les disques de rupture en acier inoxydable, tels que les nuances 304 et 316, ou en d'autres matériaux moins sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, peuvent prolonger la durée de vie des PRV composées d'éléments soumis à des contraintes élevées, tels que les ressorts, les disques, les tiges et les sièges. En résumé, moins il y a de fluide qui circule dans une PRV, mieux c'est, et les disques de rupture constituent souvent une solution fiable et rentable pour cette stratégie d'isolation.

Le risque Atex est également très présent dans le processus de reformage à la vapeur en raison de la présence de l'hydrogène et de gaz inflammables pour alimenter les brûleurs des grands réchauffeurs.

Une atmosphère explosive peut se former notamment en cas de fuite de gaz, d'extinction de la flamme du brûleur ou de défaillance des tubes catalytiques (fragilisation par l'hydrogène, rupture pneumatique, etc.).

Il est ainsi pertinent de pouvoir détecter rapidement les diverses défaillances afin de mettre en œuvre les actions adaptées. Par exemple :

- détection de la présence de flammes du brûleur (détecteur UV/IR...) ;
- détection d'une fuite d'hydrogène gazeux (détecteur de gaz, détecteur acoustique...).

Risques liés à la production d'hydrogène vert et moyens de prévention et de protection

- Source d'énergie : électricité à partir d'énergies renouvelables (solaire, éolienne et hydraulique).
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 3 %.
- Technologie : électrolyse, utilisant l'électricité pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène.

Les risques liés à la production d'hydrogène vert doivent d'abord être analysés au niveau de la source d'énergie.

Les installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables peuvent présenter des risques d'incendie inhérents qui doivent être analysés en fonction des spécificités de ces technologies. Ces aspects ne sont pas détaillés dans cet article, qui se concentre sur le stockage de l'énergie électrique afin d'assurer la stabilité du réseau et la disponibilité de l'énergie électrique, ainsi que sur son utilisation pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Les énergies renouvelables, en particulier celles provenant de sources non contrôlables telles que le solaire et l'éolien, sont souvent captées dans des batteries lithium-ion intégrées dans une construction mobile de type « conteneur maritime » appelée BESS (*Battery energy storage system* – poste stationnaire de stockage de l'énergie). Les batteries lithium-ion défectueuses peuvent subir un phénomène appelé « emballement thermique », qui est une réaction chimique engendrant une augmentation rapide de la température d'une cellule et l'émission de gaz toxiques et inflammables. Ce phénomène se propage rapidement aux cellules adjacentes (Cf. pp. 42-47).

Les incendies de batteries sont particulièrement difficiles à contrôler et à éteindre, car il est nécessaire de refroidir les cellules et d'arrêter la propagation de l'emballement thermique au cœur de la batterie. À l'heure actuelle, les systèmes traditionnels d'extinction d'incendie, basés sur une action externe avec de l'eau ou des agents chimiques, sont inefficaces contre les incendies dus à un emballement thermique et peuvent entraîner une réinflammation sous forme explosive. Des systèmes d'extinction innovants, basés sur un refroidissement interne et la gestion thermique des cellules sont en cours de développement.

La société Fike a notamment développé « Fike Blue », qui immerge le module de batterie et les cellules affectées et possède une capacité thermique suffisante pour absorber la chaleur et refroidir l'environnement, stoppant ainsi la propagation du phénomène d'emballement. Ce système empêche aussi la réinflammation des fumées émises.

Ce type de système doit être intégré dans une stratégie globale de gestion des risques, qui implique la

prévention du phénomène (qualité des batteries et des assemblages, utilisation dans les limites opérationnelles recommandées par le fabricant, maintenance des équipements, etc.), la formation du personnel de maintenance, la formalisation des procédures d'intervention, la détection des défauts (gaz, incendie, etc.), la gestion des gaz émis lors d'un emballement thermique (ventilation) et du risque d'inflammation différée (explosion).

Pour la production d'hydrogène, une fois l'énergie renouvelable captée en toute sécurité, elle peut être utilisée dans le processus d'électrolyse afin de décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Les principaux risques liés à l'électrolyse concernent les émissions d'hydrogène et d'oxygène pendant le fonctionnement normal, les fuites accidentelles d'hydrogène et les mélanges accidentels d'oxygène et d'hydrogène en cas de défaillance de la membrane de l'électrolyseur.

Ces installations présentent également des risques liés à la corrosivité de l'électrolyte (électrolyse alcaline) et aux équipements sous pression. La sécurité du système d'électrolyse doit être considérée dès la phase de conception :

- prise en compte des caractéristiques spécifiques de l'hydrogène, notamment concernant la compatibilité des matériaux et le choix des composants;
- installation de soupapes de sécurité ou de disques de rupture;
- possibilité de sécuriser le système en cas de détection d'une fuite.

Les mesures visant à prévenir le risque d'explosion dans ces installations comprennent :

- la réalisation d'une étude Atex et la mise en œuvre des mesures qui en découlent (ventilation, protection contre les explosions, équipements électriques et non électriques adaptés, etc.);
- le contrôle régulier de l'étanchéité de la membrane;
- la définition de protocoles d'intervention sur les équipements (mise en sécurité, inertage, etc.) ;
- la formation du personnel d'exploitation et de maintenance.

Conclusion

Les différentes formes de production d'hydrogène nécessitent des processus complexes, chacun présentant des risques d'incendie-explosion qui doivent être analysés et pris en compte. Il est toujours recommandé de faire appel à un expert et d'appliquer les règles de l'art existantes, que ce soit pour la conception d'une nouvelle usine de production d'hydrogène ou pour l'analyse de la sécurité de fonctionnement, l'évaluation des risques et la mise en place des systèmes de sécurité et de protection. ●

1. Source : <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>