



HAL
open science

Sécurité des électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons

Sara Soual, Florent Brissaud-Delord, Kévin Gault

► **To cite this version:**

Sara Soual, Florent Brissaud-Delord, Kévin Gault. Sécurité des électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons. Congrès Lambda Mu 23 “ Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable ” - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03876164

HAL Id: hal-03876164

<https://hal.science/hal-03876164v1>

Submitted on 28 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de la fiabilité, de la durabilité et de la sécurité des électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons

A reliability, durability and safety study of Alkaline and Polymer Electrolyte Membrane electrolyzers

SOUAL Sara
GRTgaz

1, rue du Commandant d'Estiennes
d'Orves, 92390, Villeneuve-la-Garenne
sara.soual@grtgaz.com

BRISSAUD-DELORD Florent
GRTgaz

1, rue du Commandant d'Estiennes
d'Orves, 92390, Villeneuve-la-Garenne
florent.brisaud@grtgaz.com

GAULT Kévin
GRTgaz

1, rue du Commandant d'Estiennes
d'Orves, 92390, Villeneuve-la-Garenne
kevin.gault@grtgaz.com

Résumé — La présente étude a pour objet la comparaison des deux technologies d'électrolyseur (alcalin et PEM) du point de vue de la sûreté de fonctionnement. Les résultats de cette étude s'appuient notamment sur une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDEC) comparative ; un inventaire des phénomènes de dégradation pouvant affecter la durabilité et la sécurité des électrolyseurs ; et des études de sécurité spécifiques. Des recommandations sur la conception et le mode de fonctionnement de ces technologies sont proposées en conclusion.

Mots-clefs — *analyse de risques, AMDEC, sécurité, durabilité, fiabilité, électrolyseur PEM, électrolyseur Alcalin, Power-to-gas*

Abstract — The aim of this paper is to provide an overview of the current development status of the reliability study conducted on both types of electrolyzer (alkaline and PEM). Conclusions of the study are based on a comparative Failure Modes and Effects Analysis (FMEA); an inventory of degradation phenomena that can affect the durability and safety of electrolyzers; and specific safety studies. Recommendations on the design and operation of these technologies are discussed.

Keywords — *risk analysis, FMEA, reliability, durability, safety, alkaline electrolyzer, PEM electrolyzer, Power-to-Gas.*

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de la transition énergétique, l'hydrogène présente le potentiel d'être un vecteur énergétique durable, fiable et rentable, tout en contribuant à la réduction des émissions de dioxyde de carbone. C'est pour cette raison que l'hydrogène est de plus en plus considéré pour diverses applications, soit en utilisation directe (usages industriels, mobilité), soit comme moyen de stockage des surplus d'électricité à travers son injection dans le réseau de gaz. Ainsi, le Ministre de la Transition Écologique et Solidaire a présenté en juin 2018 un Plan de Déploiement de l'Hydrogène pour la transition énergétique [10] visant à définir la stratégie nationale en matière d'hydrogène. Ce plan appelle les producteurs nationaux d'hydrogène à se tourner vers une production décarbonée et les transporteurs et distributeurs de

gaz à déterminer les conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène acceptables pour les réseaux.

Le plan d'action à horizon 2035 préconise la production d'hydrogène par électrolyse dans des installations dédiées ainsi que de l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz. Ce plan définit aussi le cadre du *Power-to-Gas*, qui semble aujourd'hui la solution la plus adaptée pour répondre au besoin de stockage d'énergie électrique en grande quantité (échelle du GWh) et sur de longues durées (saisonniers). Ce procédé permet de convertir l'électricité (notamment renouvelable en surplus de production par rapport à la consommation) en hydrogène ou en méthane de synthèse, et ainsi créer des synergies entre les réseaux électriques et gaziers pour équilibrer la production et la demande d'énergie. Aujourd'hui, quelques démonstrateurs français de *Power-to-Gas* ont déjà été mis en service, dont Jupiter 1000, afin d'améliorer les connaissances sur le sujet et comparer les différents types d'installations envisageables.

Les principales technologies de production d'hydrogène par électrolyse actuellement disponibles sont l'électrolyseur alcalin et l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM). Le choix de la technologie d'électrolyse affecte non seulement l'efficacité de la production d'hydrogène, mais aussi leur durée de vie, les risques qu'ils présentent ainsi que leur rentabilité.

Cette étude vise à comparer ces deux technologies de production d'hydrogène par électrolyse d'un point de vue de la sécurité des installations, des défaillances possibles et de la dégradation des composants afin de formuler des préconisations en termes de fonctions de sécurité ainsi que quelques éléments nécessitant une attention particulière dans le plan de maintenance. L'étude est basée sur les éléments fonctionnels des électrolyseurs PEM et Alcalins en service sur le démonstrateur industriel Jupiter 1000. Cependant, les spécificités du projet ont été écartées de l'étude afin de permettre son application à d'autres d'installations du même type.

Pour chacune des phases de l'étude, une veille bibliographique a été menée afin de documenter les connaissances sur les défaillances et risques présentés par les deux technologies d'électrolyseurs ainsi que les actions existantes visant à les réduire. La confrontation des différentes conclusions de ces phases d'étude permet d'identifier les éléments critiques en termes de fiabilité, de sécurité et de durabilité et de les examiner de manière approfondie afin d'améliorer la compréhension des phénomènes pouvant réduire la durée de vie de ces systèmes ou engendrer des problèmes de sécurité.

II. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

A. Installation de Power-to-Gas – exemple de Jupiter1000

Jupiter 1000 est un démonstrateur industriel de *Power-to-Gas*. L'installation a pour but de transformer l'électricité renouvelable (éolienne) en gaz pour pouvoir la stocker et la transporter via le réseau de transport de GRTgaz.

Jupiter 1000 [11] dispose d'une unité de production d'hydrogène, d'une puissance totale de 1 MW, constituée d'un électrolyseur alcalin et d'un électrolyseur PEM de 0,5 MW chacun, avec un débit d'hydrogène produit de l'ordre de 200 Nm³/h. L'installation comprend également une unité de traitement de l'H₂ produit, un compresseur permettant de stocker l'hydrogène à 200 bar et un poste de mélange de l'hydrogène avec le gaz naturel pour l'injection du gaz mélangé, conforme aux spécifications réglementaires applicables au gaz naturel, dans le réseau de GRTgaz.



Figure 1 - Schéma de l'installation Jupiter1000

L'objectif des activités de R&D du projet Jupiter 1000 est de développer des connaissances sur les technologies de *Power-to-Gas* et notamment d'évaluer leurs performances, en termes de sécurité et de coûts. L'AMDEC réalisée s'inscrit dans ces activités et permet de mettre en évidence les avantages et inconvénients des deux technologies d'électrolyseurs disponibles.

Le périmètre de la présente étude est restreint aux électrolyseurs PEM et alcalin et à leurs systèmes annexes (système de traitement, compression et stockage d'hydrogène).

B. Fonctionnement de l'électrolyseur alcalin

La technologie d'électrolyse alcalin est la plus répandue actuellement pour le *Power-to-Gas*. Elle est constituée de deux électrodes immergées dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) ou d'hydroxyde de sodium (NaOH) servant d'électrolyte. La cathode et l'anode sont revêtues d'un catalyseur, représenté en bleu sur la Figure 2, qui joue un rôle dans les réactions d'oxydo-réduction de l'électrolyseur. Les deux électrodes sont séparées par une membrane perméable aux ions OH⁻ et aux molécules d'eau mais pas aux gaz, pour des raisons de sécurité et d'efficacité. Chaque électrolyseur est composé d'empilements de cellules d'électrolyse.

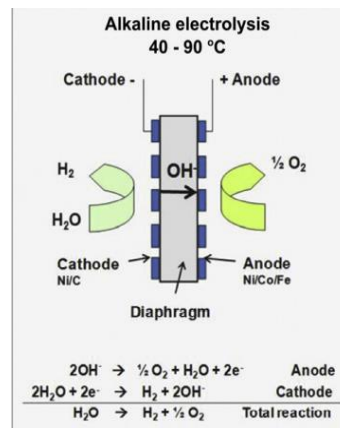


Figure 2 - Fonctionnement de l'électrolyse alcalin [3]

Le stack est alimenté en courant continu. Sa densité de courant se situe entre 2.000 et 4.000 A/m². Sa température de fonctionnement est généralement maintenue entre 80-90°C et sa pression de fonctionnement autour de 3 MPa (30 bars). La densité de courant affecte directement la vitesse de production d'hydrogène et d'oxygène. En effet, plus la densité de courant est élevée, plus il y a de gaz produit en un temps donné. D'autre part, plus la température est élevée et plus on gagne en énergie à fournir pour démarrer l'électrolyse.

C. Fonctionnement de l'électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM est une cellule de production d'hydrogène à membrane solide polymère (Nafion®) échangeuse de protons.

La membrane séparatrice est en contact direct avec le catalyseur anodique et le catalyseur cathodique. Un placage autocatalytique ou pressage à chaud permet de fixer les électrodes des deux côtés du séparateur. L'anode est généralement en titane poreux et revêtue d'un catalyseur en oxyde de métal. La cathode est en graphite poreux, couverte de platine.

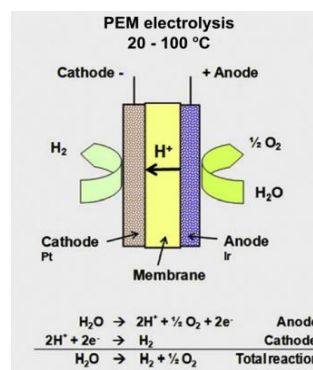


Figure 3 - Fonctionnement de l'électrolyse PEM [3]

La densité de courant continu varie entre 10.000 A/m² et 20.000 A/m², soit environ 5 fois plus que pour un électrolyseur alcalin.

L'électrolyseur PEM possède une température de fonctionnement comprise entre 50 °C à 80 °C et une pression pouvant atteindre 5 MPa. A puissance égale, son volume inférieur à celui de l'électrolyseur alcalin. Il peut aussi fonctionner sous différentes pressions en régime dynamique, car la membrane PEM est plus étanche au passage des gaz que la membrane de l'électrolyseur alcalin.

Comme il peut supporter un fonctionnement à haute pression, cela permet de réduire l'énergie nécessaire pour comprimer l'hydrogène lors de son stockage.

III. RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'ACCIDENTOLOGIE

Une recherche bibliographique a mis en lumière certaines problématiques connues des électrolyseurs PEM. Les fabricants ont notamment relevé des difficultés spécifiques aux électrolyseurs ayant des puissances élevées (développement d'installations pilotes de l'ordre du mégawatt) couplés avec des énergies renouvelables. La durée de vie des membranes de ce type d'électrolyseurs est plus faible et il a parfois été constaté une apparition de fuite au niveau des stacks [12]. Une étude a été menée par l'Institut Kurchatov, CETH et le CNRS sur les risques liés à la production d'hydrogène par électrolyse PEM à haute pression [12] :

- Risques dus à l'opération d'un système à haute pression jusqu'à 130 bars ;
- Perméation croisée d'oxygène et d'hydrogène à travers la membrane PEM, pouvant conduire à la présence d'oxygène dans la section hydrogène de l'électrolyseur ou à l'inverse.

Une recherche ciblée sur les incidents dans les électrolyseurs sur la base de données d'accidentologie h2tools a permis d'identifier 2 accidents recensés intéressants à prendre en compte pour les études de sécurité :

- **Explosion d'un système d'électrolyse de l'eau** (31/12/1969) : La réduction du débit d'électrolyte causée par le blocage du à des dépôts dans les passages d'électrolyte a entraîné une augmentation des températures des cellules et des concentrations d'électrolyte. L'augmentation de ces concentrations et des vitesses linéaires (en raison de l'obstruction des passages) a fini par entraîner de graves dommages dus à la corrosion/érosion des électrodes et séparateurs des cellules (la fragilisation par l'hydrogène peut également avoir été un facteur contributif). La rupture physique des séparateurs de cellules a permis à l'hydrogène et à l'oxygène de se mélanger et à l'hydrogène de pénétrer dans le tambour du séparateur d'oxygène. Le mélange gazeux s'est enflammé, provoquant une violente explosion qui a rompu le tambour séparateur. Les principales causes sont une maintenance non adaptée et un manque de moyens de détection d'hydrogène. Le décès d'un opérateur et d'important dommages sont à regretter.
- **Risque d'incendie du catalyseur** (le 15/07/2009) : L'augmentation de la pression différentielle dans une pompe fournissant de l'eau de retour à une pile à combustible à électrolyseur PEM a persisté pendant 4 mois et approchait de la limite d'arrêt du système.

Cette baisse de performance a été soupçonnée d'être causée par des particules fines de catalyseur en suspension dans l'eau contenant du noir de platine et des liants en Teflon®, éliminées par la pile à combustible et accumulées dans le filtre d'entrée de la pompe. La cause principale est un défaut de conception. Il n'y a pas eu de dommage.

Une recherche ciblée sur les incidents dans les électrolyseurs sur la base ARIA du BARPI a permis d'identifier 2 accidents recensés :

- **Explosion de catalyseur dans une usine de matériel électrique** (ARIA 45308, le 25/05/2014) : Dans une usine de traitement des matériaux, un électrolyseur explose à proximité d'un fût de 300 L d'ammoniaque. Il n'y a pas de feu ni de dégagement de fumée. L'activité de l'atelier s'est arrêtée jusqu'au lendemain matin. Les dépôts des substances chimiques trouvées à l'intérieur de l'équipement font l'objet d'un examen par un laboratoire spécialisé.
- **Feu dans une usine de fabrication de fils métalliques** (ARIA 28737, le 06/12/2004) : Un feu s'est déclaré durant la nuit sur une installation de production d'hydrogène d'un sous-traitant dans une entreprise de fabrication d'articles en fils métalliques. Le dysfonctionnement d'un électrolyseur est à l'origine du sinistre. La production de l'usine a été interrompue pendant 17 h. Des propositions techniques et organisationnelles ont alors été faites pour diminuer la probabilité que cet évènement se renouvelle.

IV. ETUDE DE FIABILITE ET DURABILITE

A. Principaux phénomènes de dégradation

Les éléments les plus sujets aux phénomènes de dégradation sur un électrolyseur PEM sont la membrane et les catalyseurs. Pour un électrolyseur alcalin, il s'agit principalement des catalyseurs et des électrodes qui sont immergés dans un milieu fortement basique et donc corrosif.

Les coûts des éléments sujets à la dégradation sont inférieurs pour un électrolyseur alcalin, facilitant ainsi leur remplacement. À titre de comparaison, les catalyseurs anodiques d'un électrolyseur PEM, en oxyde d'iridium (IrO_2 , pureté à 99%) et dioxyde de ruthénium (RuO_2 , pureté à 99,5%), coûtent respectivement environ 43\$ et 95\$ par gramme ; alors que les catalyseurs anodiques d'un électrolyseur alcalin, en oxyde de fer III ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, pureté à 99,8%) et oxyde de nickel II (NiO , pureté à 99%) coûtent respectivement environ 0,1\$ et 1,1\$ par gramme [9]. Ceci est également valable pour les membranes : une membrane d'un électrolyseur PEM coûte en général plus qu'une membrane Zirfon® d'un électrolyseur alcalin ; et les électrodes faites en titane d'un électrolyseur PEM coutent en général plus que les électrodes faites en nickel d'un électrolyseur alcalin.

Les problèmes fréquemment rencontrés sur un électrolyseur alcalin sont souvent liés à la corrosivité de l'électrolyte fortement basique et aux risques d'explosion si les taux des gaz traversant la membrane ne sont pas bien contrôlés. Pour un électrolyseur PEM, dès l'arrêt de l'électrolyse, la chute du potentiel dégrade le catalyseur IrO₂ et fait perdre de la surface active pour la production de H₂. Ceci nécessite donc des moyens pour garder le potentiel du côté anodique au-dessus d'une certaine valeur et éviter la réduction et la dissolution de l'IrO₂.

B. Dégradation de la membrane – électrolyseur PEM

En ce qui concerne la membrane, la dégradation peut être causée par une perforation ou altération par la dissolution du platine, du titane, ou de l'iridium à l'anode ou à la cathode. Elle implique une perméation de l'H₂ à l'anode et donc un mélange H₂/O₂ qui est potentiellement explosif. Les électrolyseurs PEM fonctionnant à des pressions souvent plus importantes, ils présentent des conditions plus favorables à l'apparition de ce phénomène. Une mesure du taux d'H₂ à l'anode permet d'évaluer la dégradation ainsi que la vitesse à laquelle cette concentration augmente. Les Constructeurs conseillent de rester en-dessous de 4% d'H₂ dans l'O₂. Cela peut également conduire à la formation d'H₂O₂. Cependant, une baisse de performance peut être observée à partir d'une concentration de 2% en H₂ à l'anode [7, 8].

La membrane PEM subit également un amincissement dû aux radicaux hydroxyles fortement oxydants et relâche des ions fluorures dans l'eau désionisée. L'amincissement de la membrane rend plus facile le passage des gaz et accélère la formation du H₂O₂ qui, à son tour, continue d'attaquer la membrane PEM. Le contrôle de la répartition de la chaleur au sein de la membrane, de la pureté d'eau entrante et des potentiels des électrodes pendant les arrêts reste primordial pour éviter un vieillissement accéléré.

C. Effet des ions métalliques

L'électrolyseur PEM est extrêmement sensible à la pureté de l'eau. En effet, les ions métalliques étrangers (Fe²⁺, Fe³⁺, Ca²⁺, Na⁺) ont des effets très néfastes vis-à-vis de la dégradation de la membrane, ceci étant particulièrement vrai pour les ions Fe²⁺ et Fe³⁺ qui sont abondants dans l'eau circulant dans des canalisations en fer ou acier, d'où l'étape supplémentaire (et coûteuse) de purification de l'eau d'entrée pour éviter une accélération des phénomènes de vieillissement au sein de l'électrolyseur PEM, qui sont initialement bien plus intenses que ceux au sein d'un électrolyseur alcalin.

A l'inverse, pour l'électrolyseur alcalin, la présence des ions Fe²⁺ et Fe³⁺ dans l'eau d'électrolyse a un effet plutôt bénéfique et protecteur vis-à-vis des catalyseurs à base de nickel, augmentant la stabilité de ces derniers, et donc la durée de vie de l'électrolyseur. C'est pourquoi, certains électrolyseurs alcalins utilisent déjà des catalyseurs à base de composés de nickel qui contiennent une faible quantité d'ions de fer. N'ayant pas de membrane polymère fragile comme dans le cas d'un électrolyseur PEM, l'électrolyseur alcalin est moins sensible aux impuretés et permet donc des périodes d'utilisation plus longues avant de nécessiter des maintenances qui sont, pour les mêmes raisons, moins coûteuses comparées à celles d'un électrolyseur PEM.

V. ETUDE DE SECURITE

Afin de fournir une comparaison en termes de sécurité des deux systèmes d'électrolyse, une analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) a été réalisée pour les électrolyseurs alcalin et PEM en phases d'utilisation, de maintenance et de fonctionnement accidentel.

A. Composition des systèmes

Les électrolyseurs alcalin et PEM incluent tous les deux une unité d'alimentation en électricité (transformateur et redresseur de tension). Une unité d'alimentation en eau permet d'apporter l'eau nécessaire à l'électrolyse et de la traiter avant son entrée dans les électrolyseurs. Elle est composée d'un réservoir de stockage des eaux qui sont continuellement recyclées, d'une pompe, d'une unité de déminéralisation et d'un filtre à fer. Les électrolyseurs sont également équipés d'un système de refroidissement.

Au niveau de l'électrolyseur, l'alcalin est composé d'une anode, d'une cathode, d'un diaphragme contenant la solution KOH ou NaOH, d'un catalyseur, de séparateurs O₂/KOH et H₂/KOH. L'électrolyseur PEM est quant à lui composé de stacks contenant une anode, une cathode, une membrane polymère, une boucle de purification d'eau supplémentaire ainsi que des séparateurs O₂/H₂O et H₂/H₂O.

B. Matrice de criticité

L'AMDEC a été réalisée sur les électrolyseurs PEM et alcalin ainsi que leurs systèmes annexes. Les classes de gravité et d'occurrence ont été définies comme suit :

TABLE I. NIVEAUX DE GRAVITE CONSIDERES

Classe	Niveau de gravité	Conséquences
4	Critique	Arrêt (+ 1 mois) Blessures sur plus d'1 personne Effets élevés sur l'environnement
3	Significatif	Arrêt prolongé (+1 jour) Blessures sur au moins 1 personne Effets sur l'environnement
2	Mineur	Arrêt court (- d'1 jour) Pas de conséquences humaines ou environnementales
1	Sans conséquence	Pas d'arrêt du système Pas de conséquences humaines ou environnementales

TABLE II. NIVEAUX D'OCCURRENCE CONSIDERES

Classe	Niveau d'occurrence	Conséquences
4	Probable	Susceptible d'apparaître plusieurs fois au cours de la vie du système
3	Rare	Probable qu'il apparaisse une fois au cours de la vie du système
2	Improbable	Très peu probable mais le risque d'apparition pendant la vie du système n'est pas négligeable
1	Extrêmement improbable	Si peu probable que le risque d'apparition pendant la vie du système peut être négligeable

TABLE III. MATRICE DE CRITICITE

Niveau d'occurrence	Niveau de gravité			
	Sans conséquence	Mineur	Significatif	Critique
Extrêmement faible	Faible	Faible	Faible	Moyen
Improbable	Faible	Moyen	Moyen	Moyen
Rare	Faible	Moyen	Élevé	Élevé
Probable	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé

C. Résultats et discussions

L'étude AMDEC a permis d'identifier les principales défaillances, les causes de celles-ci ainsi que les risques éventuels pour l'environnement, la sécurité et la disponibilité matérielle de l'installation.

Les éléments d'alimentation électrique, d'alimentation en eau, le compresseur et le stockage d'hydrogène ont été considérés comme similaires pour les deux types d'électrolyseurs.

Pour l'électrolyseur alcalin, il ressort comme principal risque une éventuelle différence de pression entre la cathode et l'anode qui pourrait endommager le diaphragme et empêcher ainsi le déplacement d'ions comme attendu.

Pour les électrolyseurs PEM, on trouve de nombreux risques dus à l'opération d'un système à haute pression ainsi que la perméation croisée d'oxygène et d'hydrogène à travers la membrane, pouvant conduire à la présence d'oxygène dans la section hydrogène ou à l'inverse.

Le risque principal de défaillance constaté et étudié sur les électrolyseurs est le risque de mélanges H_2/O_2 . Pour le PEM, cela peut être causé principalement par un endommagement de la membrane, un débit inversé accidentellement de O_2 vers H_2 ou une défaillance des systèmes annexes de recyclage de l'eau. En ce qui concerne l'alcalin, les causes de ce type de phénomène peuvent être des défaillances des systèmes de mesures, un défaut d'étanchéité au niveau de la membrane, des problèmes de corrosion en présence de KOH ou de la fragilisation de la membrane.

Les mélanges H_2/O_2 peuvent être aussi favorisés par l'introduction d'air dans des volumes remplis d'hydrogène ou l'infiltration d'air à l'aspiration du compresseur par défaut d'alimentation en hydrogène. Ce type de phénomène peut conduire à une explosion à petite échelle. Une étude HAZOP menée en parallèle a permis de mettre en évidence les différentes causes menant à de tels mélanges.

D'autres risques de défaillances majeures ont été montrés par l'étude :

- Le risque de fuites H_2 qui peut notamment être dû à des phénomènes de surpressions ou une perforation des équipements des électrolyseurs. Ce type de fuite peut être responsable de dégradation des composants qui ne sont pas fait de matériaux compatibles avec l'hydrogène aux températures de fonctionnement de l'électrolyseur et dans le pire des cas induire un risque d'incendie ou d'explosion. Il est recommandé de mettre en place des vannes de sécurité à la sortie de chaque circuit afin de bien les isoler et de mettre en place des moyens de détection et d'alerte en cas de surpression.

- Les risques de dommages électriques (courts-circuits, arcs électriques...) qui sont les mêmes pour les deux électrolyseurs car il s'agit des mêmes équipements. Ils peuvent conduire à des surchauffes du système et d'éventuels incendies. Les moyens de réduire l'apparitions d'incidents dus à ces risques est de prévoir des inspections régulières des équipements ainsi qu'une maintenance préventive adéquate. Il est aussi possible de mettre en place des systèmes d'arrêts d'urgence de l'alimentation en eau et électricité ainsi que des alarmes en cas de détection de température ou d'humidité en dehors des conditions d'utilisation prévues.

VI. CONCLUSION

Aujourd'hui, plusieurs technologies de production d'hydrogène sont disponibles et déjà en exploitation. Avec Jupiter 1000, GRTgaz et ses partenaires ont choisi d'explorer la faisabilité technique et financière de l'électrolyse PEM et alcaline à grande échelle, ainsi que les aspects de sécurité sur les deux technologies. Les électrolyseurs alcalins semblent être arrivés à maturité technologique. Ils engagent des coûts de production, d'installation et de maintenance inférieurs aux PEM et présentent un vieillissement plus faible, et donc une durée de vie longue. Cependant, cette technologie présente les inconvénients d'un démarrage souvent plus lent, d'une corrosion alcaline non négligeable, d'une maintenance fréquente et d'un encombrement d'espace dû à leur taille. D'autre part, les électrolyseurs PEM présentent les avantages d'un démarrage souvent plus rapide, d'une plus grande vitesse de production d'hydrogène, d'une compacité optimale et d'une maintenance qui peut s'avérer simple mais qui serait aussi plus fréquente et plus coûteuse. Au niveau des risques éventuellement induits par ces deux technologies, ils sont différents mais globalement de même niveau avec, cependant, une attention particulière à porter aux mélanges H_2/O_2 pour les électrolyseurs PEM en raison de leurs conditions opératoires plus favorables à l'apparition d'éléments déclencheurs de ce type de phénomènes. Aujourd'hui, un électrolyseur alcalin coute 760-1.100\$ face à 1.200-2.000\$ pour un électrolyseur PEM. Si l'on y ajoute le coût de l'alimentation électrique, du contrôle du système et du séchage de l' H_2 produit, ceci revient à environ 930\$ pour l'alcalin et 1.570\$ pour le PEM [9]. Outre le prix d'un stack, la rareté des matières premières des catalyseurs utilisés pourra être un frein au développement d'un parc de production d'hydrogène par électrolyse PEM à grande échelle. Le coût de fabrication et les taux de vieillissement élevés sont donc les principaux facteurs qui limitent le développement de la technologie PEM et qui nécessitent des améliorations issues des travaux de recherche actuels.

REFERENCES

- [1] International Electrotechnical Commission. Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary, Area: 192: Dependability [en ligne]. (2021). Disponible sur : <<http://electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=192>>
- [2] GRTgaz. Jupiter 1000 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.jupiter1000.eu/english>
- [3] M. CARMO, D. FRITZ, J. MERGEL, D. STOLTEN, "A comprehensive review on PEM water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy (38) 4901-4934, 2013.

- [4] AFHYPAC et Th. ALLEAU, “ PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU ”, Mémento de l'Hydrogène FICHE 3.2.1, septembre 2019.
- [5] UIDEnR HQE, “Les différentes technologies d'électrolyseurs”, <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/differentes-technologies-electrolyseur.php>, 2020.
- [6] M. REYTIER, M. PETITJEAN, F. LE NAOUR “ FIDELHYO Fiabilisation de l'électrolyse de l'eau à haute température pour la production d'Hydrogène”, Séminaire mi-parcours HPAC 2009, 7 décembre 2011.
- [7] GHOLAMREZA. 2020. High performance and cost-effective membrane.
- [8] ORNELAS, R. 2009. Solid polymer electrolyte water electrolyser based on Nafion-TiO2 composite membrane for high temperature operation. En ligne : www.academia.edu
- [9] BERTUCCIOLI & al. 2014. Study on development of water electrolysis in the EU
- [10] Ministère de la transition écologique et solidaire. Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique. 2018 En ligne : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf
- [11] F. Brissaud & al., R&D activities on Jupiter 1000, a Power-to-Gas industrial demonstrator with electrolysis, methanation and gas injection to the gas transmission network, 28th World Gas Conference, Daegu, Korea, 23-27 May 2022
- [12] Fateev, V. Grigoriev, S.Millet, P. Korobtsev, S. Porembskiy, V. Auprêtre, F. High pressure pem water electrolysis and corresponding safety issues. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 36, Issue 3. 2011. Pages 2721-2728. ISSN 0360-3199.