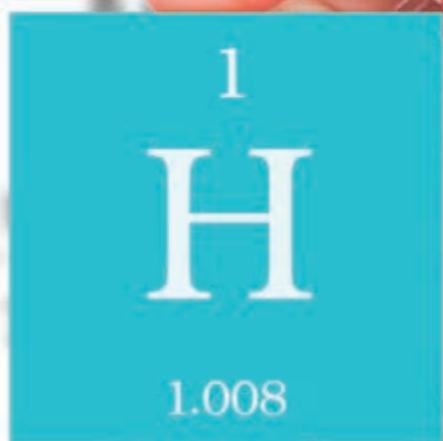


# Guide d'information sur les risques et les mesures de **sécurité liés** à la **production décentralisée** d'**hydrogène**



**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

**Guide d'information**  
JUN 2015

En partenariat avec :



Etude réalisée par INERIS et ENEA Consulting pour le compte de l'ADEME - Contrat N° I394C0002.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

# Membres

du comité technique de l'étude  
et contributeurs du guide

- ADEME : Luc Bodineau
- ADVENTA : Jean-Luc Mussot
- ALPHEA : Gauthier Winné
- AREVA H2GEN : Fabien Auprêtre
- AREVA SE : Franck Verbecke
- ATAWAY : Pierre-Jean Bonnefond
- CERAMHYD : Arthur Mofakhami et Christian Westarp
- ENEA CONSULTING : Jacques De Bucy
- H2NOVA : Frederic Barth
- INERIS : Benno Weinberger et Sylvaine Pique
- ITM POWER : Lucas Bertrand et Nick Hart
- LINDE : Christophe Coulibeuf
- MAHYTHEC : Dominique Perreux
- MC PHY : Antoine Rivière
- POWIDIAN : Jean-Marie Bourgeois et Mailys Duru
- WH2 : Philippe Samat

# Sommaire

Table des figures.....	6
Table des tableaux.....	7
Contenu et objectifs du guide.....	8
Contexte.....	9
L'hydrogène-énergie, une filière industrielle émergente en France.....	9
Une maîtrise industrielle en matière de risques.....	11

## I - Méthode

1.1 - Organisation de l'étude et méthode d'analyse des risques.....	12
1.2 - Limites de l'étude.....	13

## 2 - Production décentralisée d'hydrogène

2.1 - Technologies.....	14
2.1.1 - Électrolyse.....	14
2.1.2 - Purification de l'hydrogène.....	16
2.1.3 - Compression et stockage en bouteilles.....	16
2.1.4 - Stockage sur hydrures.....	16
2.1.5 - Pile à combustible.....	17
2.2 - Exemples d'installation type.....	17
2.2.1 - Production d'hydrogène par électrolyse PEM et stockage en bouteilles.....	17
2.2.2 - Production d'hydrogène par électrolyse alcaline et stockage sur hydrures.....	18
2.2.3 - Production d'électricité avec stockage d'hydrogène pour site isolé.....	18

## 3 - Risques associés aux substances manipulées

3.1 - Terminologie liée à la sécurité.....	20
3.1.1 - Risque.....	20
3.1.2 - Limite inférieure et supérieure d'explosivité.....	20
3.1.3 - Feu torche.....	20
3.1.4 - Explosion.....	20
3.2 - Hydrogène.....	21
3.3 - Oxygène.....	22
3.4 - Gaz d'inertage.....	22
3.5 - Hydroxydes.....	23
3.5.1 - Hydroxyde de potassium.....	23
3.5.2 - Hydroxyde de sodium.....	23
3.6 - Hydrures.....	24
3.7 - Synthèse.....	24

## 4 - Prévention, détection et contrôle des événements redoutés

4.1 - Fuite d'hydrogène dans l'air ambiant.....	25
4.1.1 - Événement redouté et conséquences.....	25
4.1.2 - Causes et moyens de prévention.....	25
4.1.3 - Moyens de détection et de contrôle.....	27
4.2 - Formation d'un mélange hydrogène-oxygène ou hydrogène-air dans les équipements.....	29
4.2.1 - Événement redouté et conséquences.....	29
4.2.2 - Causes et moyens de prévention.....	29
4.2.3 - Moyens de détection et de contrôle.....	32

<b>4.3 - Exposition des hydrures à l'air et à l'eau.....</b>	<b>33</b>
4.3.1 - Événement redouté et conséquences .....	33
4.3.2 - Causes et moyens de prévention .....	33
4.3.3 - Moyens de détection et de contrôle.....	34

<b>4.4 - Autres éléments spécifiques aux technologies utilisées .....</b>	<b>35</b>
4.4.1 - Risque de gel.....	35
4.4.2 - Diffusion de poudres d'hydrures dans les équipements.....	35

<b>4.5 - Rappel de bonnes pratiques générales .....</b>	<b>35</b>
---	-----------

<b>4.6 - Moyens humains pour la maîtrise des risques ...</b>	<b>35</b>
--	-----------

<b>5 - Récapitulatif des moyens de maîtrise des risques.....</b>	<b>36</b>
--	-----------

<b>Conclusion.....</b>	<b>38</b>
------------------------	-----------

<b>Bibliographie.....</b>	<b>39</b>
---------------------------	-----------

<b>6 - Annexe 1 : normes et documents de référence .....</b>	<b>40</b>
--	-----------

<b>6.1 - Normes.....</b>	<b>40</b>
6.1.1 - Textes généraux.....	40
6.1.2 - Systèmes de production d'hydrogène.....	40
6.1.3 - Textes relatif à la gestion des surpressions.....	41
6.1.4 - Textes spécifiques à certains éléments des installations .....	41

<b>6.2 - Textes spécifiques en Europe .....</b>	<b>42</b>
---	-----------

<b>6.3 - Textes internationaux.....</b>	<b>42</b>
---	-----------

<b>7 - Annexe 2 : analyse des retours d'expérience .....</b>	<b>43</b>
--	-----------

<b>7.1 - Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.....</b>	<b>43</b>
7.1.1 - Électrolyse alcaline .....	43
7.1.2 - Électrolyse PEM.....	43

<b>7.2 - Compression d'hydrogène .....</b>	<b>44</b>
--	-----------

<b>7.3 - Transfert d'hydrogène en canalisation .....</b>	<b>44</b>
--	-----------

<b>7.4 - Stockage d'hydrogène.....</b>	<b>44</b>
7.4.1 - Stockage en bouteilles.....	44
7.4.2 - Stockage sous forme d'hydrures.....	44

<b>7.5 - Enseignements transverses.....</b>	<b>44</b>
---	-----------

<b>8 - Annexe 3 : tableaux de propriétés des substances manipulées .....</b>	<b>46</b>
--	-----------

<b>8.1 - Hydrogène .....</b>	<b>46</b>
------------------------------	-----------

<b>8.2 - Oxygène .....</b>	<b>46</b>
----------------------------	-----------

<b>8.3 - Azote .....</b>	<b>46</b>
--------------------------	-----------

<b>8.4 - Argon.....</b>	<b>47</b>
-------------------------	-----------

<b>8.5 - Hydroxyde de potassium .....</b>	<b>47</b>
---	-----------

<b>8.6 - Hydroxyde de sodium.....</b>	<b>47</b>
---------------------------------------	-----------

# Table des figures

<b>Figure 1</b> - Densité énergétique massique de différents carburants (en millions de joules par kg (MJ/kg)).....	9
<b>Figure 2</b> - Densité volumique d'énergie de différents carburants (en millions de joules par m <sup>3</sup> (MJ/m <sup>3</sup> )) .....	10
<b>Figure 3</b> - Schéma descriptif de l'analyse préliminaire des risques.....	12
<b>Figure 4</b> - Schéma d'une cellule d'électrolyse d'eau alcaline .....	15
<b>Figure 5</b> - Schéma d'une cellule d'électrolyse PEM .....	15
<b>Figure 6</b> - Schéma bloc simplifié d'un électrolyseur .....	15
<b>Figure 7</b> - Électrolyseur PEM d'Areva H2Gen.....	15
<b>Figure 8</b> - Conteneur de stockage d'hydrogène sur hydrures de McPhy.....	16
<b>Figure 9</b> - Pile H2 Range Extender 5 kW (SymbioFCCell ALP 5) .....	17
<b>Figure 10</b> - Schéma d'une unité type de production d'hydrogène par électrolyse PEM et stockage en bouteilles en environnement industriel.....	17
<b>Figure 11</b> - Schéma d'une unité type de production d'hydrogène par électrolyse alcaline et stockage sur hydrures en environnement industriel.....	18
<b>Figure 12</b> - Schéma d'une unité type de production d'électricité avec stockage d'hydrogène pour site isolé.....	19
<b>Figure 13</b> - Unité autonome de production d'électricité avec stockage d'hydrogène pour site isolé conçue par ATAWAY.....	19
<b>Figure 14</b> : Origines des incidents identifiées.....	45

# Table des tableaux

<b>Tableau 1</b> - Réactions mise en jeu en électrolyse alcaline et PEM.....	14
<b>Tableau 2</b> - Propriétés d'inflammation et de combustion de mélanges de certains combustibles.....	21
<b>Tableau 3</b> - Synthèse des principaux risques liés aux substances manipulées .....	24
<b>Tableau 4</b> - Causes et moyens de prévention des fuites d'hydrogène dans l'air ambiant.....	27
<b>Tableau 5</b> - Moyens de détection et de contrôle disponibles pour les fuites d'hydrogène dans l'air ambiant.....	28
<b>Tableau 6</b> - Causes et moyens de prévention des mélanges H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> à l'intérieur des équipements.....	31
<b>Tableau 7</b> - Causes et moyens de prévention des mélanges H <sub>2</sub> -air à l'intérieur des équipements.....	31
<b>Tableau 8</b> - Moyens de détection et de contrôle pour les mélanges H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> et H <sub>2</sub> -air dans les équipements.....	32
<b>Tableau 9</b> - Causes et moyens de prévention d'une exposition des hydrures à l'air ou l'eau.....	34
<b>Tableau 10</b> - Moyens de détection et de contrôle d'une exposition des hydrures à l'air ou à l'eau.....	34
<b>Tableau 11</b> - Moyens de maîtrise des risques par équipements .....	36/37
<b>Tableau 12</b> - Textes généraux relatifs à la sécurité des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène .....	40
<b>Tableau 13</b> - Normes relatives aux systèmes de production d'hydrogène.....	41
<b>Tableau 14</b> - Normes relatives à la gestion des surpressions .....	41
<b>Tableau 15</b> - Documents spécifiques au stockage et aux piles à combustible.....	41
<b>Tableau 16</b> - Directives européennes applicables aux installations de production décentralisée d'hydrogène.....	42
<b>Tableau 17</b> - Documents de référence internationaux.....	42
<b>Tableau 18</b> - Propriétés physicochimiques de l'hydrogène.....	46
<b>Tableau 19</b> - Propriétés physicochimiques de l'oxygène.....	46
<b>Tableau 20</b> - Propriétés physicochimiques de l'azote .....	46
<b>Tableau 21</b> - Propriétés physicochimiques de l'argon.....	47
<b>Tableau 22</b> - Propriétés physicochimiques de l'hydroxyde de potassium.....	47
<b>Tableau 23</b> - Propriétés physicochimiques de l'hydroxyde de sodium.....	47

# Contenu et objectifs du guide

**La production décentralisée d'hydrogène comme vecteur énergétique renouvelable s'adresse à de vastes marchés et applications potentiels : la mobilité, la production d'électricité et de chaleur stationnaire, le stockage d'électricité sous forme de gaz.**

- Ce guide s'adresse aux maîtres d'ouvrage, aux décideurs, aux installateurs de systèmes, aux services en charge de la sécurité, aux bureaux d'étude et prescripteurs ou, plus généralement, à tous les acteurs intéressés par le développement ou l'installation d'une unité de production décentralisée d'hydrogène, mais non familiers des problématiques de sécurité pour ce type d'installations innovantes.
- Ce guide s'appuie sur le savoir-faire des acteurs de la filière (industriels, équipementiers et exploitants) qui ont été associés à sa réalisation. Il a pour objet de présenter l'état actuel des connaissances sur la maîtrise des risques liés aux installations de production décentralisée d'hydrogène, mettant en œuvre notamment un procédé d'électrolyse de l'eau. La vocation de ce guide n'est pas prescriptive, mais pédagogique et pratique : il présente les technologies mises en œuvre et donne des recommandations de sécurité pour la conception, l'installation ou l'exploitation de ce type de procédés, qui pourront être concrètement reprises dans le cadre de projets.
- L'approche méthodologique sur laquelle repose ce guide est basée sur une analyse qualitative et générique des risques et des moyens de maîtrise de ces risques sur les installations de production décentralisée d'hydrogène. Le cadre d'analyse est celui de l'analyse préliminaire des risques, qui a été appliqué sur des exemples types d'installation.
- Ce guide représente un premier document de capitalisation des connaissances et du savoir-faire en matière de sécurité. Il donne également un état des lieux des documents de référence (normes, directives, guides de conception) et de l'accidentologie relatifs à ce type d'installations.

**Mots clés :** hydrogène, risques, sécurité, prévention, production, électrolyse.

# Contexte

## L'hydrogène-énergie, une filière industrielle émergente en France

l'industrie chimique comme composant, notamment dans la fabrication d'ammoniac, le raffinage d'hydrocarbures et le traitement des matériaux. Il n'existe pas à l'état naturel. Plus de 95 % de l'hydrogène mondial est produit par vaporeformage d'hydrocarbures, notamment de gaz naturel, un procédé de dissociation de molécules carbonées en présence de vapeur d'eau et de chaleur.

En marge de cette voie de production, en réponse aux impératifs de lutte contre le changement climatique, des procédés se développent, utilisant des sources primaires renouvelables (électricité renouvelable, biomasse solide, biogaz) pour synthétiser de l'hydrogène que l'on qualifiera de renouvelable. Parmi eux, on peut citer l'électrolyse de l'eau valorisant de l'électricité renouvelable (procédé électrochimique produisant de l'hydrogène et de l'oxygène à partir d'eau et d'électricité), le vaporeformage de biogaz, ou encore la gazéification de biomasse (procédé thermochimique qui produit un mélange de gaz, dont l'hydrogène).

### ■ Les applications de l'hydrogène-énergie

Outre ses applications industrielles, l'hydrogène peut être utilisé dans de nombreuses applications en tant que vecteur énergétique : on parle alors d'hydrogène-énergie. Il peut être converti en électricité ou en chaleur pour des applications de mobilité ou pour une production stationnaire, notamment dans le cas de bâtiments isolés ou autonomes en énergie. Cette conversion est assurée par l'intermédiaire de piles à combustible, des convertisseurs électrochimiques dont la technologie est déjà éprouvée avec de nombreux brevets déposés par le Japon, les États-Unis et l'Europe (1 806 brevets internationaux déposés en 2010 et 2 732 en 2011).

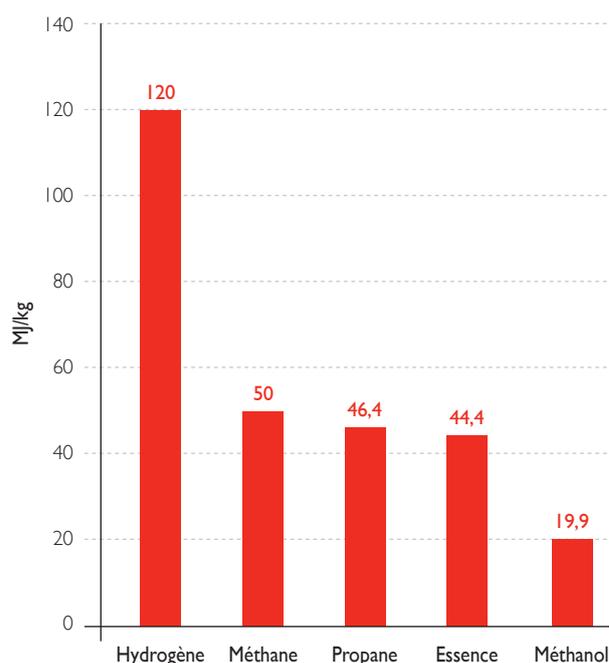
[1 : voir page 39].

Dans le domaine de la mobilité, par exemple, cette alternative aux carburants conventionnels (essence, diesel) présente l'avantage combiné de ne produire aucun polluant atmosphérique lors de son utilisation et d'offrir un stockage d'énergie à bord, donc une autonomie supérieure à celle des véhicules électriques.

L'hydrogène peut, en effet, être utilisé comme solution de stockage d'électricité, solution intéressante dans le cas de production électrique renouvelable intermittente. L'électricité est alors transformée en hydrogène par électrolyse de l'eau pour être ensuite valorisé en tant que gaz combustible ou reconverti en électricité par une pile à combustible dans des applications mobiles ou stationnaires.

L'hydrogène peut être stocké et transporté sous forme gazeuse, en bouteilles, par compression du gaz jusqu'à 700 bar; ou dans des matrices solides, notamment par absorption dans les hydrures métalliques. Comme l'indique la figure 1 l'hydrogène a une densité énergétique massique supérieure aux autres carburants. Par conséquent, la masse d'hydrogène requise pour délivrer une énergie donnée est réduite par rapport à d'autres carburants. Une propriété intéressante dans le domaine aérospatial où la masse totale des équipements doit être maîtrisée.

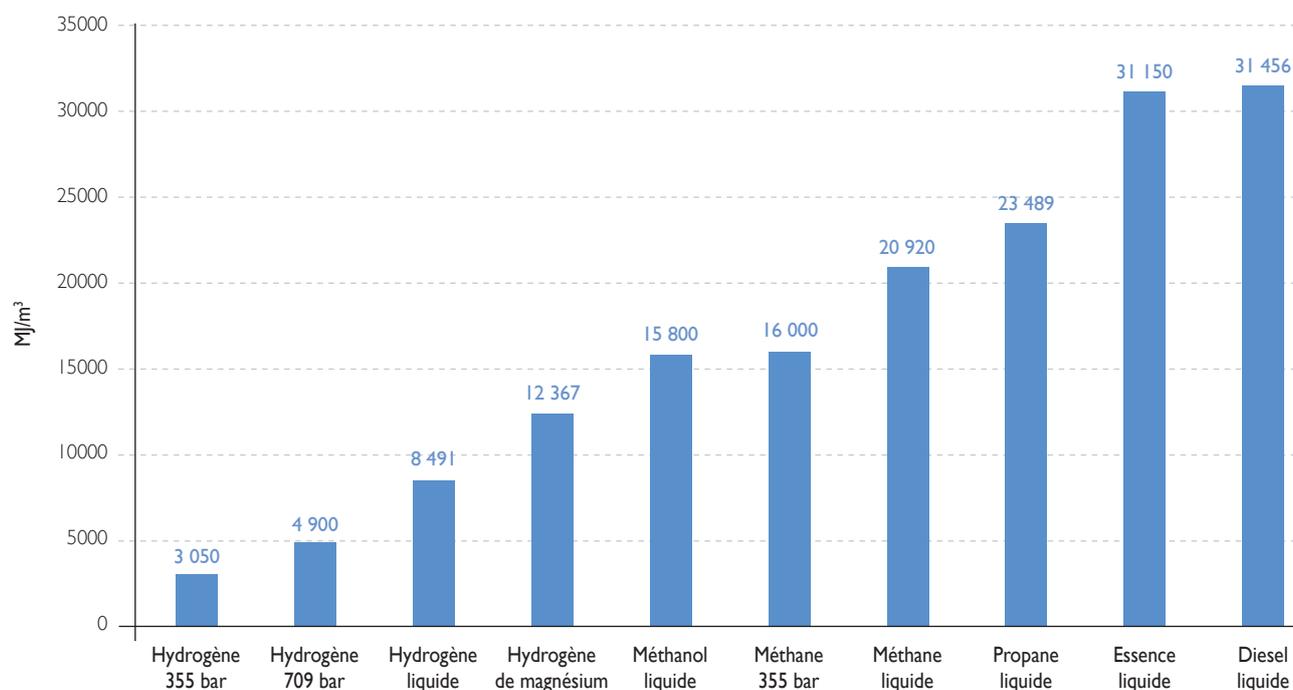
FIGURE 1 - DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE MASSIQUE DE DIFFÉRENTS CARBURANTS (EN MILLIONS DE JOULES PAR kg (MJ/kg))



Toutefois, sous forme de gaz comprimé, il nécessite un volume important de stockage, car sa densité énergétique volumique est plus faible que celle des autres carburants (voir figure 2). L'absorption dans des matrices solides

suivie de la désorption pour le déstockage de l'hydrogène est une alternative susceptible de réduire les volumes et la pression des unités de stockage, mais cela tend à en augmenter la masse.

**FIGURE 2 - DENSITÉ VOLUMIQUE D'ÉNERGIE DE DIFFÉRENTS CARBURANTS (EN MILLIONS DE JOULES PAR m<sup>3</sup> (MJ/m<sup>3</sup>))**



## ■ Une production décentralisée

L'émergence de ces voies de production renouvelables et de ces applications implique un mode de production plus décentralisé que ce qui se fait actuellement dans l'industrie, notamment parce que les ressources (eau, électricité renouvelable, biogaz, biomasse) seront essentiellement disponibles à l'échelle locale et que les usages (stations-services ou utilisation domestique) seront décentralisés.

L'électrolyse de l'eau et le vaporeformage de biogaz sont actuellement les voies de production d'hydrogène décentralisées et renouvelables les plus proches du marché en France pour les applications de mobilité, de stockage d'énergie et d'alimentation en énergie de sites isolés. Un certain nombre d'entreprises françaises développent ces technologies, et de nombreux projets pilotes ou de démonstration sont en cours, à un niveau de développement plus ou moins avancé (voir encadré ci-contre).

## ■ Plusieurs projets de démonstration en France

- La **plateforme MYRTE** (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique) est installée, depuis 2012, sur le site de l'université de Corse à Ajaccio. C'est la première réalisation en France à grande échelle d'une production d'hydrogène par électrolyse, connectée à des panneaux solaires. La plateforme associe, outre l'université de Corse, le CEA et Areva H2Gen. Son principal objectif est de tester la capacité des électrolyseurs à stocker l'électricité produite par les panneaux solaires, pour la restituer au réseau électrique ilien, lors des pics de demande. L'hydrogène est produit par électrolyse et stocké ; sa conversion en électricité est assurée par l'intermédiaire d'une pile à combustible. Les puissances testées (stockage et injection sur le réseau) sont de 15 kW électriques. L'expérimentation, menée depuis trois ans, a permis de valider, sur un plan technique, la capacité des technologies électrolyseur et pile à écrieter et à lisser, pour les besoins du réseau, une production d'électricité solaire donnée.
- Le **projet GRHYD** a été lancé, en 2014, à Dunkerque. Porté par le centre de recherche et d'innovation de GDF Suez (le Crigen), il a pour but de tester la valorisation des excédents électriques d'origine renouvelable (éolienne dans le cas de GRHYD) sous forme d'hydrogène en mélange avec du gaz naturel du réseau. Au-delà des études préparatoires en cours, deux usages seront testés à partir de 2016 :
  - la mobilité. L'agglomération de Dunkerque exploitera, dans le cadre de l'organisation du transport urbain, une cinquantaine de bus adaptés à l'utilisation d'un mélange jusqu'à contenant 20 % d'hydrogène et 80 % de gaz naturel pour véhicules (GNV) ;
  - les usages domestiques. L'injection directe d'hydrogène dans le réseau de distribution du gaz naturel sera testée sur un quartier résidentiel de 200 logements, pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la cuisson. Cette opération consiste en particulier à vérifier l'acceptabilité sociétale d'une telle innovation. L'hydrogène sera produit par électrolyse à membrane échangeuse de protons - ou PEM, pour Proton Exchange Membrane - (150 kW), et stocké sous forme solide (hydrure). Le projet, d'une durée de cinq ans, associe dix partenaires au Crigen : GrDF, GNVert, Areva H2, CEA, McPhy, Ineris, Cetiati, CUD, Ineo, STDE.
- Le **projet LASHY** (Local Alternative Solid Hydrogen), engagé en 2012 pour trois ans, vise également à tester la valorisation d'électricité renouvelable par l'hydrogène. Porté par WH2 et Hydroforce, il repose sur l'installation d'un électrolyseur alcalin de 65 kW adossé au barrage hydraulique de Port-Mort dans l'Eure. L'autorisation préfectorale ayant été récemment obtenue, la production d'hydrogène démarrera mi-2015 : celui-ci sera stocké sous forme solide (hydrures), puis valorisé par divers clients industriels situés sur le territoire. Outre la faisabilité technique, ce projet a pour ambition de valider l'intérêt économique de la voie hydrogène pour les producteurs d'hydroélectricité.
- Le **projet THEMIS**, lancé en 2013 pour une durée de trois ans, a pour but de développer une solution d'autonomie énergétique pour alimenter en électricité des sites isolés (antennes-relais, refuges, habitats isolés). Le système développé par la société Atawey, en partenariat avec Air Liquide et Arelis, s'appuie sur l'association d'une production d'électricité renouvelable (éolien, solaire) et d'un double stockage, par batterie et sous forme d'hydrogène. Ce dernier est produit par un électrolyseur alcalin et stocké dans des hydrures. Une pile à combustible permet de restituer de l'électricité lorsque les usages en aval le nécessitent. Ce moyen de stockage de grandes quantités d'énergie 8 mégawattheure (MWh) dans le cas du premier prototype réalisé sur de longues durées assure l'autonomie du système pour toute l'année. Après une phase d'ingénierie et de dimensionnement du système, un premier démonstrateur entrera en opération à l'été 2015.

L'hydrogène peut aussi être produit à partir de biogaz, par vaporeformage. Le projet Vabhyogaz a démontré, en 2014, la faisabilité de ce procédé à partir de biogaz issu de la dégradation des déchets fermentescibles d'une installation de stockage de déchets non dangereux, à Labessière-Candeil dans le Tarn. Le projet, coordonné par la société Albhyon et associant Trifyl, Verdemobil et Solagro, a mis en œuvre un pilote de 5 Nm<sup>3</sup>/h<sup>(1)</sup>.

## Une maîtrise industrielle en matière de risques

Tout comme d'autres gaz combustibles ou sources d'énergie, la manipulation d'hydrogène comporte des risques. Les particularités de l'hydrogène, en comparaison à d'autres combustibles comme le gaz naturel ou l'essence, ont imposé de nouveaux savoir-faire et de nouvelles pratiques pour garantir la sécurité des personnes exposées.

En France, le cadre réglementaire s'appliquant aux installations de production décentralisée d'hydrogène est

celui des textes conçus pour la production d'hydrogène à plus grand échelle. Le développement d'une filière de production décentralisée d'hydrogène repose sur un déploiement d'unités de petite taille, dont l'implantation doit être facilitée par une réglementation adaptée et une information réaliste à destination du public sur les risques associés à ces installations. Il est pour cela nécessaire de capitaliser les connaissances et les méthodes de maîtrise des risques et de les diffuser auprès des acteurs qui interviendront dans le développement de la filière.

(1) Le normo-m<sup>3</sup> est un mètre cube aux conditions normales de température et pression.

# I - Méthode

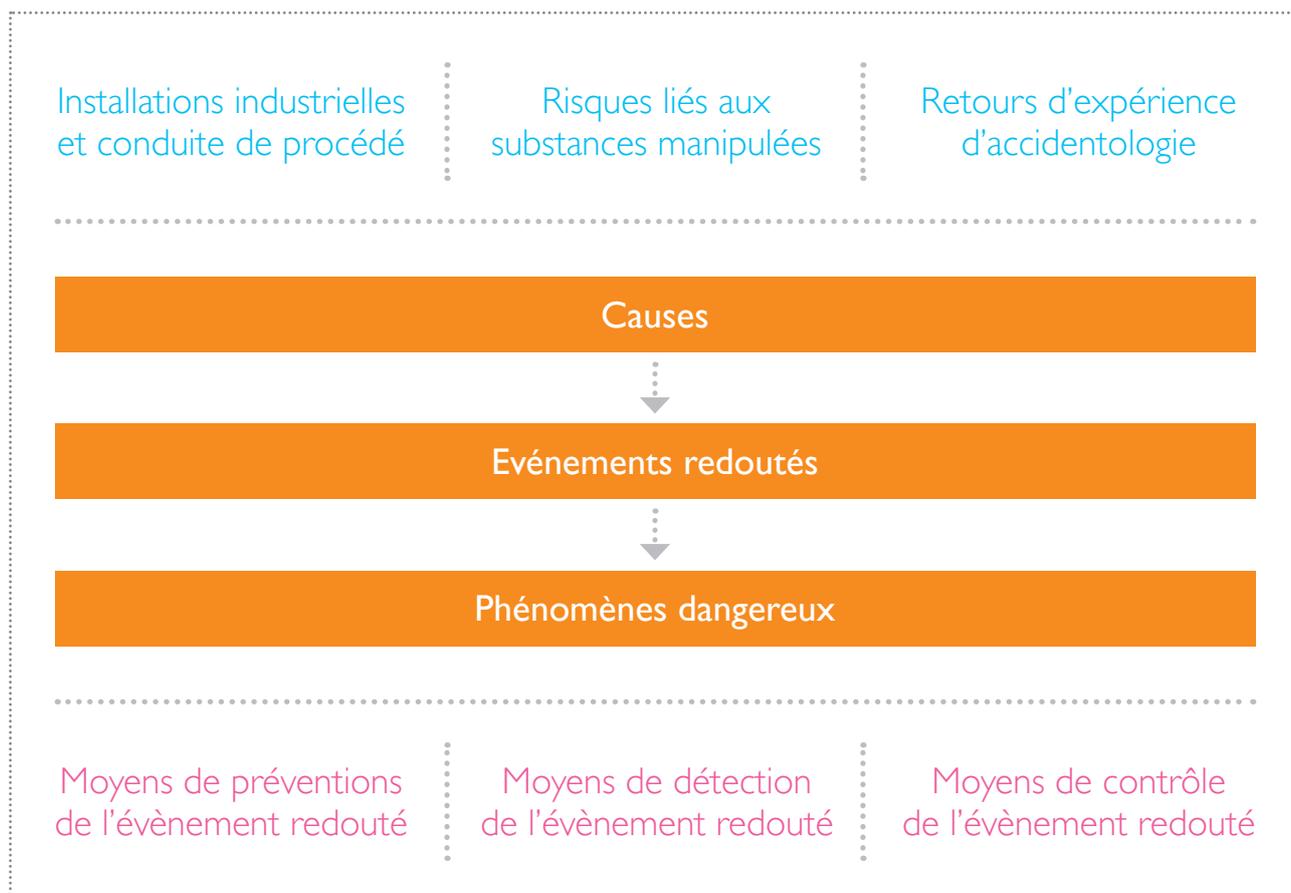
## I.1 - Organisation de l'étude et méthode d'analyse des risques

Ce guide se base sur une étude des technologies et des procédés mis en œuvre dans les installations de production décentralisée d'hydrogène. Quatre exemples d'installation type ont été sélectionnés par l'ADEME pour leur représentativité des premières installations qui pourraient voir le jour à l'échelle commerciale en France. L'une d'entre elles, la production d'hydrogène par vaporeformage de biogaz, n'a pas pu être modélisée par manque d'informations disponibles auprès des acteurs de la filière concernée.

Les trois autres installations font appel à l'électrolyse de l'eau, par voie alcaline ou à membrane échangeuse de protons (ou PEM, pour Proton Exchange Membrane), et sont présentées en section 2.2 :

- **Installation type n° 1** : électrolyse de l'eau par voie PEM avec stockage en bouteilles pour une application mobilité ou stockage d'énergie ;
- **Installation type n° 2** : électrolyse de l'eau par voie alcaline avec stockage sur hydrures pour une application mobilité ou stockage d'énergie ;
- **Installation type n° 3** : électrolyse de l'eau par voie alcaline avec stockage sur hydrures pour une application stationnaire en site isolé.

FIGURE 3 - SCHÉMA DESCRIPTIF DE L'ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES RISQUES



Les informations ont été collectées auprès des acteurs de la filière (industriels, équipementiers et exploitants). Elles concernent la description des technologies, des procédés et des moyens mis en œuvre pour la maîtrise des risques.

L'Ineris a réalisé une analyse préliminaire des risques (APR) pour chaque installation type. Cette démarche a permis d'identifier des phénomènes dangereux (incendies, explosions), les événements qui peuvent les produire (perte de confinement, réaction chimique violente) et leurs causes (erreurs humaines, défaillances techniques). La figure 3 décrit le principe de cette méthode. Les données d'entrée des études de cas portent sur les installations industrielles en question et leur conduite de procédé, les risques liés aux substances dangereuses manipulées, ainsi qu'une revue des retours d'expérience d'accidentologie sur des installations similaires.

Cette analyse permet d'identifier les trois moyens permettant de maîtriser ces risques : la prévention des causes initiales ; la détection des phénomènes dangereux ; la protection par le contrôle des effets de ces phénomènes. Une description de la méthodologie générale d'une APR est consultable dans le document Oméga 7 - Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle (2006). [2 : voir page 39]

Les résultats des APR ont été partagés avec les acteurs de la filière qui en ont fait une revue critique, afin de garantir la pertinence et la faisabilité des solutions recommandées. Ainsi, les moyens de maîtrise des risques présentés dans ce guide incluent à la fois les bonnes pratiques actuelles des acteurs de la filière et des éventuelles recommandations de moyens alternatifs ou additionnels.

## 1.2 - Limites de l'étude

Dans le but de proposer une analyse générique sur des exemples d'installations type mais non réels et non exhaustifs, ce guide est à considérer dans le cadre des limites et précautions suivantes :

- Les exemples d'installations concernent la seule production décentralisée d'hydrogène et n'abordent ni les phases de transport-distribution, ni d'utilisation de l'hydrogène hors du site de production.
- L'analyse des risques ne considère que la phase d'utilisation des équipements de production d'hydrogène (démarrage, opération, arrêt, redémarrage, etc.), pas le transport de l'installation depuis son site de fabrication jusqu'au site d'utilisation, ni sa mise en route, sa maintenance ou son démantèlement.
- Les risques et les moyens de sécurité sont identifiés de façon qualitative, indépendamment du débit et des quantités de produits manipulés ou de la taille des équipements. Les potentiels de danger (comme la distance à laquelle serait ressenti le rayonnement thermique ou l'onde de surpression) ne sont donc pas évalués.
- L'approche de l'étude et la sélection des exemples d'installation ne sont pas orientés vers un type d'application ou de marché spécifique (mobilité, génération d'électricité et de chaleur stationnaire, stockage d'électricité, etc.), mais vers les technologies de production et de stockage d'hydrogène, alors que les contraintes et les moyens de sécurité à mettre en place dépendent également de l'application, et donc du marché d'implantation.
- Les résultats de l'étude se focalisent sur les données actuellement existantes et disponibles.

# 2 - Production décentralisée d'hydrogène

## 2.1 - Technologies

Les installations de production décentralisée d'hydrogène considérées dans le cadre de ce guide mettent en œuvre plusieurs étapes : la production d'hydrogène par électrolyse alcaline ou PEM (Proton Exchange Membrane), sa purification, la compression et le stockage de l'hydrogène en bouteilles ou son stockage direct par absorption sur hydrures. En outre, l'un des trois exemples d'installation concerne la fourniture d'énergie en site isolé et intègre donc une pile à combustible.

### ■ 2.1.1 - Électrolyse

L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique produisant de l'hydrogène et de l'oxygène à partir d'eau et d'électricité.

Cette réaction est mise en œuvre dans des cellules d'électrolyse contenant de l'eau avec deux compartiments séparés par un diaphragme ou une membrane. L'hydrogène est produit dans l'un des deux compartiments, l'oxygène dans l'autre.

Deux voies d'électrolyse de l'eau sont actuellement utilisées à l'échelle industrielle : la voie alcaline et la voie PEM. Elles diffèrent par le type d'électrolyte, c'est-à-dire par le support qui assure l'équilibre électrique dans le bain réactionnel. La voie alcaline utilise une solution aqueuse d'électrolyte alcalin (hydroxyde de sodium ou

de potassium) : les électrons circulent de la cathode (électrode négative) vers l'anode (électrode positive) par le circuit électrique. Le compartiment contenant la cathode consomme de l'eau pour produire de l'hydrogène et des ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>), tandis que le compartiment contenant l'anode consomme des ions hydroxyde et produit de l'oxygène (voir réactions en tableau I et schéma en figure 4). Les deux compartiments sont séparés par un diaphragme à travers lequel passent les ions hydroxyde.

L'électrolyse PEM utilise un électrolyte solide sous forme de membrane polymère conductrice de protons qui sépare les deux compartiments. Les électrons circulent également par le circuit électrique de la cathode vers l'anode. Les deux électrodes sont collées à la membrane. L'eau s'oxyde sur l'anode pour former de l'oxygène et des protons, libérant des électrons. Les protons (ions H<sup>+</sup>) traversent la membrane et se recombinent à la cathode pour former de l'hydrogène en captant des électrons (voir réactions en tableau I et schéma en figure 5).

Pour les grands électrolyseurs, les cellules d'électrolyse sont disposées en série dans des empilements (voir figure 5). Un électrolyseur peut en contenir plusieurs. Dans chaque empilement, de l'eau circule dans les compartiments hydrogène et oxygène. D'un côté l'eau s'enrichit en hydrogène gazeux et de l'autre côté elle s'enrichit en oxygène gazeux.

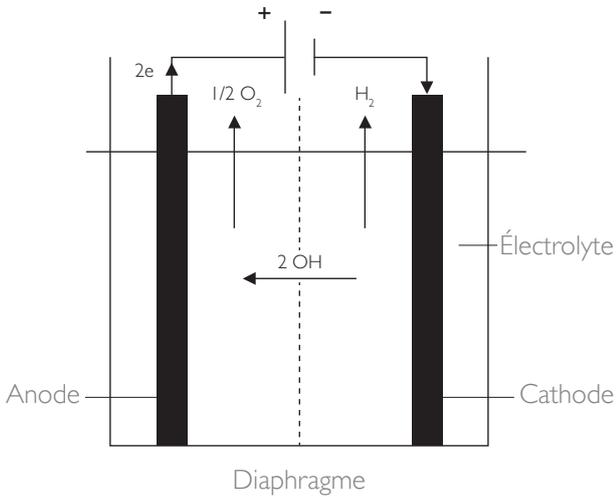
**TABLEAU I - RÉACTIONS MISE EN JEU EN ÉLECTROLYSE ALCALINE ET PEM**

Propriétés	Electrolyse alcaline	Electrolyse PEM
Réaction de production d'hydrogène à la cathode	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
Réaction de production d'oxygène à l'anode	$2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 2e^-$	$H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e^-$

L'eau utilisée dans le procédé doit être déminéralisée, afin d'éviter l'encrassement des parois ou de la membrane de l'électrolyseur. Pour cela, un module de déminéralisation, utilisant par exemple le procédé d'osmose inverse, peut être utilisé sur le site de production d'hydrogène.

Le procédé d'électrolyse libère de la chaleur qui provoque une montée en température de l'eau. Cette chaleur est évacuée par un système de refroidissement des cellules ou de l'eau, de telle sorte que la température des flux de sortie des empilements ne dépasse pas une valeur limite (typiquement fixée entre 60 °C et 80 °C).

**FIGURE 4 - SCHÉMA D'UNE CELLULE D'ÉLECTROLYSE D'EAU ALCALINE**

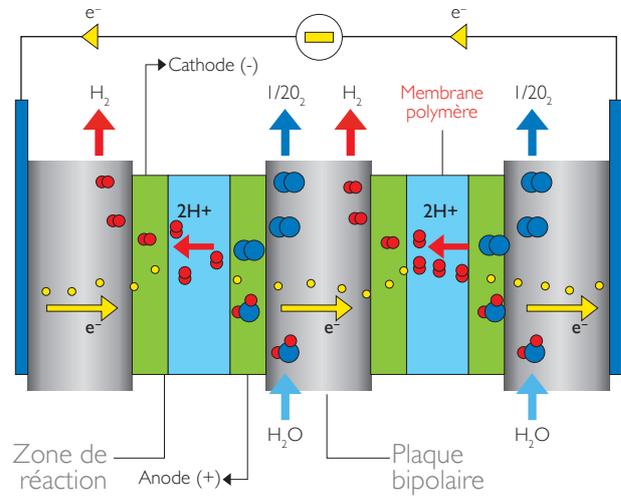


Source : Afhyprac

En sortie d'empilements, l'eau contenant de l'hydrogène gazeux côté cathode et celle contenant de l'oxygène gazeux côté anode sont dirigées vers deux réservoirs-séparateurs distincts. Dans chacun, l'eau et son gaz sont séparés, puis l'eau est réinjectée dans les empilements. L'oxygène en sortie de réservoir-séparateur est soit relâché dans l'atmosphère via un circuit d'évent, soit stocké pour être valorisé. L'hydrogène est envoyé vers une unité de purification.

Pour la production d'une mole d'oxygène à l'anode, deux moles d'hydrogène sont produites à la cathode. Ce phénomène crée un déséquilibre de débit qui peut, dans certains cas, créer un déséquilibre de pression que le système doit compenser.

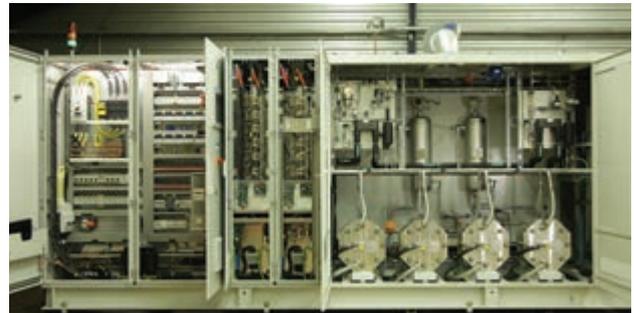
**FIGURE 5 - SCHÉMA D'UNE CELLULE D'ÉLECTROLYSE PEM**



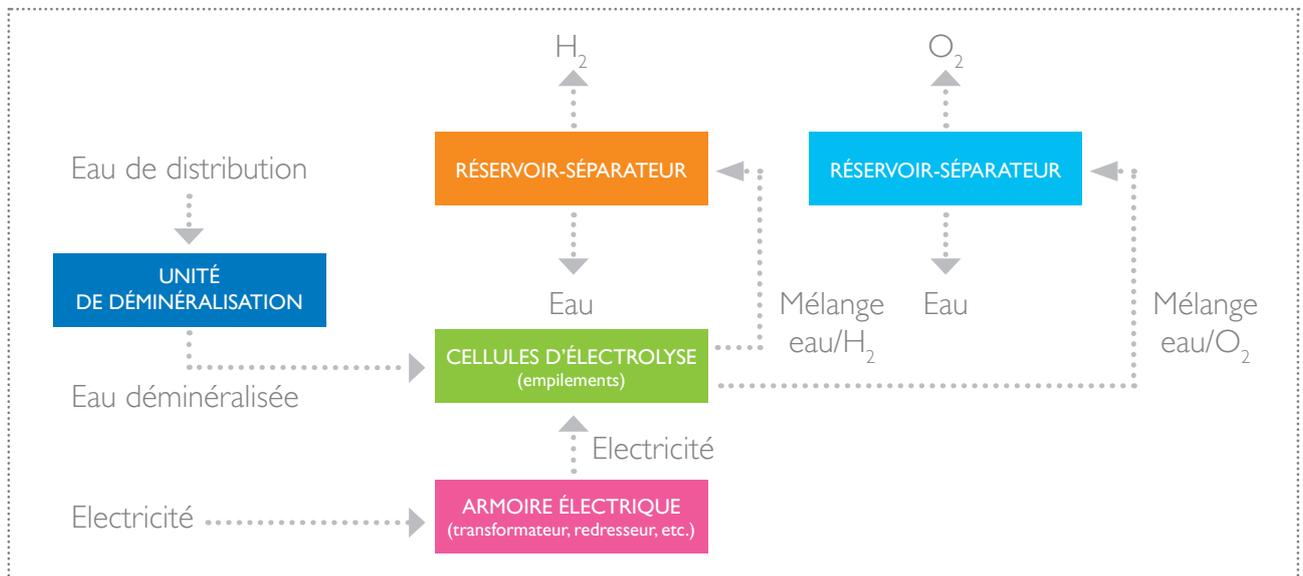
Source : Afhyprac

La figure 6 schématise un bloc simplifié d'électrolyseur, la figure 7, un exemple d'électrolyseur PEM.

**FIGURE 7 - ÉLECTROLYSEUR PEM D'AREVA H2GEN**



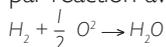
**FIGURE 6 - SCHÉMA BLOC SIMPLIFIÉ D'UN ÉLECTROLYSEUR**



## ■ 2.1.2 - Purification de l'hydrogène

L'hydrogène sortant du réservoir-séparateur contient encore de l'eau et quelques traces d'oxygène et d'hydroxyde en cas d'électrolyse alcaline, qui doivent être retirées du flux gazeux. C'est pourquoi un module de purification de l'hydrogène, par séchage, est souvent intégré à l'électrolyseur. La première étape de séchage consiste à refroidir ce flux à travers un échangeur pour condenser une partie de l'eau et de l'hydroxyde.

Les traces d'oxygène sont ensuite éliminées du flux, si nécessaire, au moyen d'un recombineur catalytique par réaction avec de l'hydrogène produisant ainsi de l'eau :



Enfin, l'hydrogène contenant encore de l'eau passe à travers un lit de zéolithes, un matériau capable de piéger les molécules d'eau par adsorption. Lorsque ce lit est saturé en eau, il est régénéré en étant chauffé par une résistance électrique ; les molécules d'eau piégées sont ainsi libérées. Deux lits de zéolithes sont utilisés en parallèle pour qu'un lit soit toujours disponible pour traiter le flux d'hydrogène à sécher. La purification du gaz peut ainsi avoir lieu en continu.

## ■ 2.1.3 - Compression et stockage en bouteilles

Les électrolyseurs fonctionnent sous pression dans une gamme typique de 3 à 30 bar. Ils peuvent également être équipés de systèmes de compression, comme dans le cas des installations concernées par ce guide : le flux d'hydrogène est comprimé dans le compartiment de compression, en sortie du module de purification. Les technologies et le nombre d'étages de compression utilisés dépendent de la pression de sortie requise, pouvant atteindre 1 000 bar. Le phénomène de compression augmentant la température de l'hydrogène, un groupe froid alimente des échangeurs de refroidissement d'hydrogène situés à la sortie de chaque étage de compression.

L'hydrogène est transféré vers les bouteilles de stockage, dès la sortie des compresseurs. Un collecteur connecte la tuyauterie de transfert et les bouteilles. Les matériaux utilisés sont métalliques ou composites. Ces réservoirs (dits « de type I, II, III ou IV », selon les niveaux de pression, les caractéristiques des matériaux, etc.) ont été progressivement développés grâce aux avancées technologiques sur les matériaux, et notamment pour les alléger en vue d'applications de mobilité pour lesquelles les pressions communément envisagées sont de 350 ou 700 bar. Les réservoirs de type I sont entièrement métalliques ; ceux de type II sont métalliques, avec une virole renforcée en fibre de carbone ; ceux de type III entièrement bobinés avec un revêtement qui supporte

une partie des contraintes liées à la pression ; ceux de type IV entièrement bobinés avec un revêtement qui ne supporte aucune contrainte liée à la pression.

Le stockage en bouteilles peut être divisé en un ou plusieurs compartiments connectés en parallèle à la sortie du module de compression. Les compartiments sont remplis successivement par le compresseur d'alimentation. Les bouteilles peuvent être remplies et vidées simultanément, ce qui offre une flexibilité de stockage intéressante : la bouteille peut à la fois absorber une production d'hydrogène discontinue issue d'un électrolyseur et restituer de l'hydrogène selon la demande en aval.

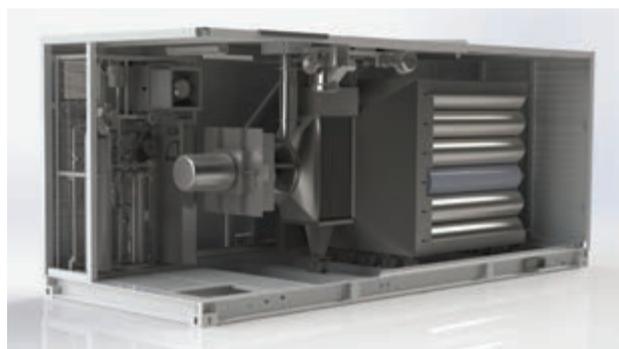
## ■ 2.1.4 - Stockage sur hydrures

Dans le cas d'un stockage sur hydrures, un matériau à l'état solide, l'hydrogène est envoyé vers le module de stockage à la pression de l'électrolyseur (typiquement 10 bar), sans compression intermédiaire.

Le module de stockage sur hydrures fonctionne selon des séquences distinctes de stockage et de déstockage. En phase de stockage, le réservoir d'hydrures est alimenté en hydrogène à la sortie de l'unité de purification ; l'hydrogène est absorbé sur les hydrures. La température et la pression d'absorption dépendent du type d'hydrures. Sur les hydrures de magnésium, l'hydrogène s'absorbe par exemple à 10 bar et 380 °C et se désorbe à 2 bar et 310 °C. La réaction d'absorption libère de la chaleur, ce qui nécessite de refroidir le réservoir d'hydrures pour maintenir une température constante. En phase de déstockage, le réservoir d'hydrures est chauffé pour produire la réaction de désorption de l'hydrogène qui consomme de la chaleur.

Il existe de nombreux types d'hydrures, et de nouveaux types sont régulièrement développés pour les applications de stockage d'hydrogène. La figure 8 illustre un dispositif qui met en œuvre des hydrures de type magnésium.

**FIGURE 8 - CONTENEUR DE STOCKAGE D'HYDROGÈNE SUR HYDRURES DE MCPHY**



### ■ 2.1.5 - Pile à combustible

La pile à combustible permet de produire de l'énergie à partir d'hydrogène. Elle convertit l'hydrogène en électricité, en eau et en chaleur, selon la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. Les piles à combustible peuvent être stationnaires pour produire de l'électricité pour un site isolé ou l'injecter sur le réseau, ou bien embarquées pour des applications de mobilité (voitures, bus, chariots-élévateurs, etc.) comme l'illustre la figure 9.

Tout comme une cellule d'électrolyse, une pile à combustible contient une anode et une cathode séparées par un électrolyte. De nombreux types de piles à combustible existent selon le type d'électrolyte, d'anode et de cathode. Parmi les types d'électrolytes envisageables, on peut citer l'hydroxyde de potassium, les membranes polymères, l'acide phosphorique, les sels fondus, ou encore la céramique.

**FIGURE 9 - PILE H2 RANGE EXTENDER 5 KW (SYMBIOFCELL ALP 5)**



## 2.2 - Exemples d'installation type

### ■ 2.2.1 - Production d'hydrogène par électrolyse PEM et stockage en bouteilles

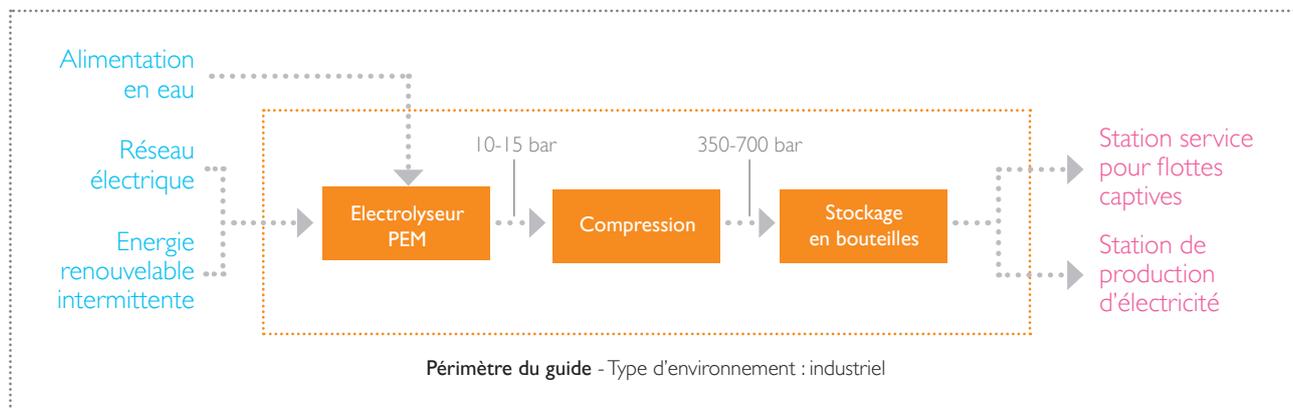
Premier exemple d'installation type : une unité de production d'hydrogène par électrolyse PEM couplée à un module de compression et de stockage en bouteilles. Elle peut être destinée à alimenter une station-service pour les véhicules d'un site industriel ou d'une municipalité (chariots-élévateurs, voitures, autobus, camions), ou bien à stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène, transféré ensuite vers une station de production d'électricité.

L'électricité utilisée pour l'électrolyse de l'eau peut provenir du réseau électrique ou d'un parc de production d'énergie renouvelable intermittente. L'hydrogène est produit à une pression comprise entre 10 et 15 bar. Il est purifié (séchage et élimination de l'oxygène), puis comprimé entre 350 et 700 bar et mis en bouteilles. Des travaux de développement sont en cours pour augmenter la pression de l'hydrogène délivré par les électrolyseurs et réduire le besoin de compression en aval.

Les modules d'électrolyse et de compression peuvent être abrités dans des conteneurs. Le stockage d'hydrogène en bouteilles est typiquement installé à l'extérieur.

La figure 10 représente le schéma de l'installation et le périmètre considéré dans ce guide.

**FIGURE 10 - SCHÉMA D'UNE UNITÉ TYPE DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE PEM ET STOCKAGE EN BOUTEILLES EN ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL**



## 2.2.2 - Production d'hydrogène par électrolyse alcaline et stockage sur hydrures

Deuxième exemple d'installation type : une unité de production d'hydrogène par électrolyse alcaline couplée à un module de stockage sur hydrures. Les applications sont les mêmes que dans le premier exemple, ainsi que les sources possibles d'électricité. L'hydrogène est produit à une pression comprise entre 10 et 15 bar. Il est purifié (séchage et élimination de l'oxygène et des traces d'hydroxyde), puis stocké sous forme d'hydrures. Des travaux de développement sont en cours pour augmenter la pression de l'hydrogène délivré par les électrolyseurs et réduire le besoin en compression en aval.

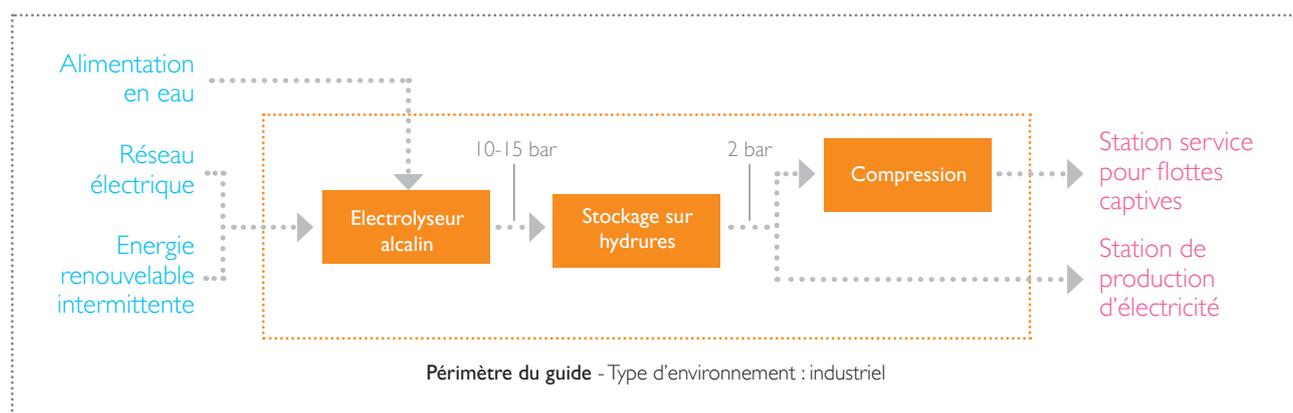
Selon l'application visée (station-service ou de production d'électricité), l'hydrogène devra être comprimé, ou non, avant utilisation.

La production d'hydrogène et le stockage sur hydrures sont en général situés dans deux conteneurs distincts, de 40 pieds.

Le conteneur de stockage est soumis à des variations de température selon qu'il est en phase de stockage (température ambiante) ou de déstockage de l'hydrogène (température supérieure à 350 °C).

La figure 11 représente le schéma de l'installation et le périmètre considéré dans ce guide.

**FIGURE 11 - SCHÉMA D'UNE UNITÉ TYPE DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE ALCALINE ET STOCKAGE SUR HYDRURES EN ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL**



## 2.2.3 - Production d'électricité avec stockage d'hydrogène pour site isolé

Troisième exemple : une unité de production d'hydrogène en site isolé destinée à alimenter une infrastructure en électricité de façon autonome. Une source d'énergie renouvelable et intermittente, telle que des panneaux solaires photovoltaïques, alimente l'unité. Celle-ci comporte une solution de stockage d'électricité de courte durée (batteries) et une autre de longue durée mettant en œuvre production, stockage et production d'électricité par l'intermédiaire d'une pile à combustible. Le stockage d'électricité de longue durée est mis à profit lorsque les batteries sont pleines alors que l'énergie intermittente est disponible.

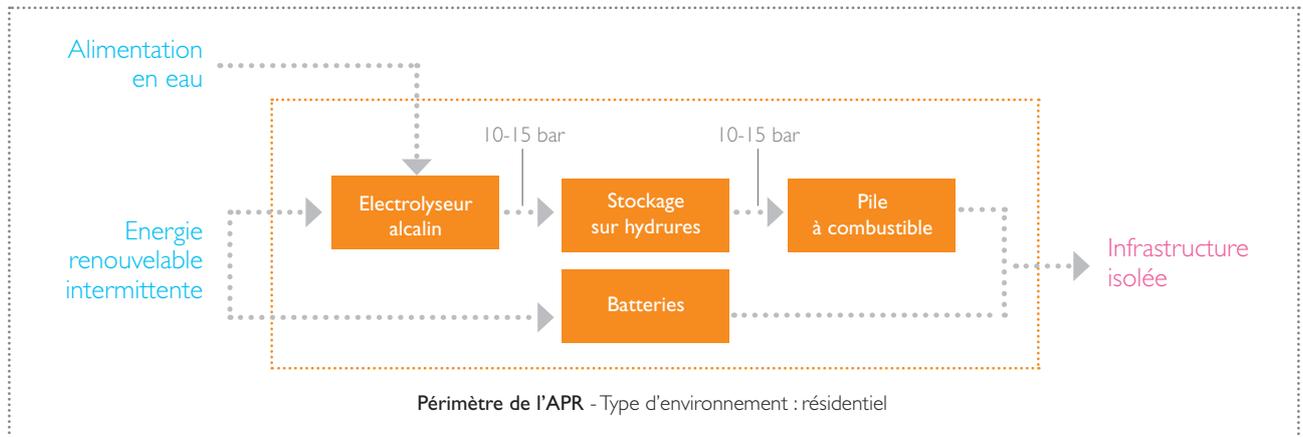
L'hydrogène est produit par électrolyse alcaline à une pression comprise entre 10 et 15 bar. Il est purifié (séchage et élimination de l'oxygène et des traces d'hydroxyde), puis stocké sous forme d'hydrures.

Les équipements sont confinés dans une enveloppe rigide installée à l'extérieur et à distance des bâtiments résidentiels.

La figure 12 représente le schéma de l'installation et le périmètre considéré dans ce guide.

La figure 13 illustre une unité autonome de ce type conçue par Atawey.

**FIGURE 12 - SCHEMA D'UNE UNITE TYPE DE PRODUCTION D'ELECTRICITE AVEC STOCKAGE D'HYDROGENE POUR SITE ISOLE**



**FIGURE 13 - UNITE AUTONOME DE PRODUCTION D'ELECTRICITE AVEC STOCKAGE D'HYDROGENE POUR SITE ISOLE CONÇUE PAR ATAWEY**



# 3 - Risques associés aux substances manipulées

## 3.1 - Terminologie liée à la sécurité

### ■ 3.1.1 - Risque

Le terme « risque », tel que défini généralement dans une analyse de sécurité d'une installation industrielle, est la résultante de deux paramètres : la probabilité d'occurrence d'un événement dangereux et la gravité de cet événement.

Dans le cadre de ce guide, ce terme est utilisé sans référence directe à ces deux paramètres qui n'ont pas été quantifiés pour les exemples d'installations considérés. Sont seulement évoqués ici des scénarios d'événements non souhaités, les phénomènes dangereux qu'ils peuvent engendrer et leurs conséquences (voir figure 3 en section 1.1). Mais ni leur probabilité d'occurrence ni leur gravité ne sont évaluées.

### ■ 3.1.2 - Limite inférieure et supérieure d'explosivité

Un gaz ou liquide combustible peut s'enflammer au contact d'un comburant (oxygène pur, air enrichi ou air naturel) dans la limite de proportions de mélange appelées limite inférieure d'explosivité (LIE) et limite supérieure d'explosivité (LSE) et en présence d'un apport d'énergie. En-dessous de la LIE, le mélange ne contient pas suffisamment de combustible pour s'enflammer et au-dessus de la LSE il ne contient pas suffisamment de comburant pour s'enflammer.

Le terme « explosivité » est utilisé dans la réglementation française bien que les proportions de mélange définies par les LIE et LSE ne concernent pas systématiquement une explosion mais, parfois, une simple inflammation. En d'autres termes, si les proportions d'un mélange combustible-comburant dépassent la LIE, une inflammation de ce mélange ne produira pas systématiquement une explosion. À titre d'exemple, l'hydrogène a une LIE de 4 % volumique dans l'air à pression et température ambiante. Le risque d'inflammation du mélange est bien réel à partir de 4 % mais, selon le retour d'expérience de l'Ineris, en milieu ouvert, le mélange n'est explosif, avec des effets de pression significatifs, qu'à partir de 8 % volumique d'hydrogène à pression et température ambiante.

Les valeurs de LIE et LSE sont propres à chaque type de mélange combustible-comburant et varient selon ses conditions de pression et de température. Si le comburant est de l'oxygène pur, la plage de LIE-LSE est plus grande que si le comburant est de l'air. Dans le cas de l'hydrogène, l'augmentation de la température augmente la plage de LIE-LSE, tandis que l'augmentation de la pression la réduit.

Les valeurs de LIE et LSE sont généralement données pour un mélange avec de l'air, aux conditions de température et de pression normales (TPN) de 25 °C et 101,3 kPa (1 atm). Ces valeurs sont données pour l'hydrogène en section 3.2.

### ■ 3.1.3 - Feu torche

Le phénomène de feu torche est produit par l'inflammation d'un jet de combustible gazeux. Une flamme se forme et perdure le temps de la fuite. Cette flamme est caractérisée par une réaction de combustion à l'interface entre le combustible et le comburant. Dans l'environnement industriel, les feux torche appelés également jets enflammés peuvent survenir à la suite de fuites accidentelles de fluides inflammables ou d'évacuations intentionnelles de produits résiduels par l'intermédiaire de torchères. Afin de maîtriser les impacts de tels événements, il est important de pouvoir prévoir et évaluer les conséquences associées : il est notamment nécessaire d'estimer les caractéristiques géométriques de la flamme (longueur, largeur, décollement) et de déterminer les flux thermiques émis dans l'environnement.

### ■ 3.1.4 - Explosion

Une explosion peut être de deux types : physique ou thermique. L'explosion dite « physique » est provoquée par un éclatement pneumatique, par exemple l'éclatement d'un réservoir clos (typiquement un réacteur), dû à l'augmentation excessive de la pression des gaz qu'il contient ou à l'affaiblissement localisé de la résistance de ses parois. L'explosion produit alors essentiellement des effets de surpression, ainsi que des effets de projection.

L'explosion dite « thermique » est issue de l'inflammation d'un nuage ou panache de gaz ou de vapeurs combustibles mélangés à un comburant en proportions suffisantes pour créer une surpression.

À la suite de l'inflammation, une flamme se propage dans le nuage ou le panache et engendre une combustion des vapeurs et une onde de surpression aérienne qui sont susceptibles de produire respectivement des effets de rayonnement thermique et des effets mécaniques.

L'explosion engendre une déflagration lorsque la vitesse du front de flamme est subsonique : les gaz alentours sont comprimés par l'expansion du volume enflammé, et l'augmentation de la surpression est continue. Elle engendre une détonation lorsque la vitesse du front de flamme est supersonique : les gaz alentour sont alors comprimés de façon quasi adiabatique, ce qui génère une onde de choc. Une détonation conduit à un danger supplémentaire par rapport à une déflagration, car elle produit localement de fortes surpressions capables de provoquer d'importants dégâts sur les bâtiments et les personnes alentour.

Les effets thermiques d'une explosion sont dus au rayonnement de la flamme et des gaz chauds de combustion. Leur portée et leur gravité sont variables selon l'étendue de la propagation de l'explosion et selon sa vitesse. De façon générale, les effets thermiques ont tendance à être plus importants en milieu ouvert tandis que les effets de surpression sont plus importants en milieu confiné.

### 3.2 - Hydrogène

Comme tout autre gaz ou liquide combustible, l'hydrogène présente des risques liés à ses propriétés physico-chimiques. Elles sont résumées dans le tableau 18 en annexe (voir section 8.1), ainsi que les risques associés.

L'hydrogène se distingue des autres gaz ou liquides combustibles, comme le gaz naturel, le propane ou l'essence, par plusieurs aspects, facilitant ou complexifiant la maîtrise des risques :

- Une propension à fuir plus importante : la molécule d'hydrogène est de très petite taille et de faible viscosité, ce qui facilite les fuites en comparaison aux autres gaz combustibles<sup>(2)</sup>.

Par ailleurs, la plus grande perméation de l'hydrogène à travers les matériaux provoque également plus de fuite que les autres gaz combustibles ;

- Une probabilité d'inflammation plus élevée : l'énergie d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est plus de 10 fois inférieure à celle du propane ou du gaz naturel. La probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est très élevée, même sans présence de flamme ou d'étincelle ;
- Une probabilité d'explosion à l'air libre plus faible : la forte diffusivité de l'hydrogène dans l'air ambiant réduit le risque de formation d'un nuage explosif, et donc d'explosion en cas de fuite en milieu non confiné ;
- Une combustion plus rapide : l'hydrogène brûle environ 7 fois plus rapidement que le méthane, ce qui favorise la transition d'une déflagration vers une détonation ;
- Une flamme très peu visible : le rayonnement d'une flamme d'hydrogène se situe essentiellement dans le domaine ultraviolet. Le rayonnement le plus visible (de couleur orangée) est celui de la vapeur d'eau générée lors de la combustion de l'hydrogène. Le cœur de la flamme, d'une température supérieure à 2 000 °C est pratiquement invisible en plein jour ; la flamme est bien visible dans l'obscurité. Cette caractéristique constitue un danger supplémentaire, en particulier pour les équipes d'intervention en cas d'incendie ;
- Une flamme très peu radiative : malgré sa haute température, la flamme d'hydrogène transmet peu d'énergie aux corps étrangers par rayonnement, ce qui limite le risque de propagation du feu par effet thermique.

Ci-après, le tableau 2, issu des recommandations techniques ISO/TR 15916 « Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène », reporte les limites inférieure et supérieure d'explosivité de l'hydrogène, du méthane, du propane et de l'essence, ainsi que leur température d'auto-inflammation et leur énergie minimale d'inflammation dans l'air dans le cas d'un mélange stœchiométrique.

**TABEAU 2 - PROPRIÉTÉS D'INFLAMMATION ET DE COMBUSTION DE MÉLANGES DE CERTAINS COMBUSTIBLES [3]**

Propriétés	Unité	Hydrogène	Méthane	Propane	Essence
Limite inférieure d'explosivité (LIE) aux TPN <sup>(3)</sup>	% vol.	4,0	5,3	1,7	1,0
Limite supérieure d'explosivité (LSE) aux TPN	% vol.	75,0	17,0	10,9	6,0
Température d'auto-inflammation	°C	585	537	450	215
Énergie minimale d'inflammation dans l'air <sup>(4)</sup>	mJ	0,017	0,274	0,24	0,24

(2) L'hélium est le seul gaz doté d'une taille moléculaire semblable à celle de l'hydrogène. Les propriétés inertes de l'hélium en font un très bon agent pour tester l'étanchéité des installations visant à contenir de l'hydrogène.

(3) Conditions de température et de pression normales.

(4) Les valeurs d'énergie minimale d'inflammation de l'hydrogène dans l'air varient selon la composition du mélange. Elles sont données ici pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique.

La plage d'explosibilité de l'hydrogène se situe entre 4 % et 75 % en volume d'hydrogène dans l'air, dans les conditions normales de pression et de température. Selon le retour d'expérience de l'Ineris, un mélange entre 4 % et 8 % volumique en hydrogène en milieu non confiné peut créer un feu de nuage. À partir de 8 % volumique, le mélange est susceptible de produire une explosion de type déflagration. Au-delà de 11 %, la probabilité d'explosion de type détonation est importante, même si celle-ci n'est pas systématique. Elle dépend de l'encombrement environnant et de la chaleur au voisinage du mélange.

Par ailleurs, l'hydrogène peut fragiliser certains matériaux métalliques. Ses atomes ont tendance à pénétrer dans certains alliages métalliques : ils endommagent leur structure cristalline, accélérant la propagation des microfissures, notamment sous contrainte. Ce phénomène peut provoquer des ruptures brutales d'un matériau bien en dessous de sa limite de rupture en l'absence d'hydrogène. Selon l'ISOTR 15916 « Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène », les alliages d'aluminium sont en général assez peu sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, de même que les aciers inoxydables du type 316L. À l'inverse, les aciers ferritiques y sont souvent sensibles.

### 3.3 - Oxygène

L'oxygène est un coproduit de l'électrolyse de l'eau. Il est sans odeur et incolore à l'état gazeux, légèrement bleuté à l'état liquide. L'oxygène est un comburant : il ne brûle pas, mais entraîne la combustion d'autres substances. Il réagit également avec la plupart des métaux et matériaux organiques. Les valeurs de ses principales propriétés physicochimiques sont fournies dans le tableau 19 en annexe (voir section 8.2).

Les risques liés à l'utilisation de l'oxygène sont dus à :

- la réactivité de l'oxygène avec les matériaux ;
- l'influence de l'oxygène sur la plage d'explosivité ;
- l'influence de l'oxygène sur l'énergie minimale d'inflammation d'un combustible ;
- l'influence de l'oxygène sur la vitesse laminaire de flamme ;
- l'influence de l'oxygène sur la température adiabatique de flamme.

La réactivité de l'oxygène avec les matériaux varie selon le type de matériaux et les conditions d'exposition : la réaction peut être lente (cas de la rouille de l'acier) ou rapide (cas d'une combustion ou d'une explosion). De nombreux matériaux réagissent avec l'oxygène. Ceux à mettre en contact direct doivent donc être choisis avec précaution pour être le moins réactifs possible dans leurs conditions d'utilisation.

Les limites d'explosivité d'un gaz ou d'une vapeur combustible dans l'oxygène ainsi que les énergies minimales d'inflammation peuvent varier de façon significative par rapport aux valeurs dans l'air [4 : voir page 39] :

- la limite inférieure d'explosivité dans l'oxygène pur diffère très peu de celle dans l'air ;
- la limite supérieure d'explosivité dans l'oxygène pur est bien plus élevée que celle dans l'air ;
- l'énergie minimale d'inflammation dans l'oxygène pur est diminuée dans des rapports compris entre 50 et 200 par rapport à sa valeur dans l'air ;
- la vitesse laminaire de flamme et la température adiabatique de flamme sont plus élevées dans une atmosphère enrichie en oxygène.

Les étincelles qui, en temps normal, seraient sans danger peuvent être à l'origine d'incendies dans des atmosphères enrichies en oxygène, et les matériaux ou substances qui, en temps normal, ne brûleraient pas dans l'air y compris les matériaux ignifugés peuvent brûler vigoureusement, voire spontanément.

Parmi les mesures à prendre pour gérer le risque lié à l'enrichissement en oxygène :

- l'analyse chimique des atmosphères susceptibles d'être enrichies en oxygène ;
- l'exclusion des personnes des zones enrichies (par exemple, zones autour des points de purge, etc.) ;
- le choix de matériaux adaptés ;
- la maîtrise de l'étanchéité ;
- la séparation des matériaux combustibles du gaz ou du liquide enrichi en oxygène ;
- l'utilisation de composants propres, spécifiquement nettoyés pour un usage avec de l'oxygène ;
- la formation du personnel aux risques liés à l'oxygène.

### 3.4 - Gaz d'inertage

L'azote et l'argon sont des gaz inertes généralement utilisés pour purger les équipements et tuyauteries sur les installations manipulant de l'hydrogène. L'argon peut notamment être utilisé pour les parties exposées à certains hydrures réactifs avec l'azote. Leurs principales caractéristiques physicochimiques sont fournies dans le tableau 20 et le tableau 21 en annexe (voir sections 8.3 et 8.4).

L'argon, gaz plus lourd que l'air, peut s'accumuler dans les zones confinées et appauvrir ainsi l'air en oxygène. Cela risque de provoquer une anoxie, principal risque lié à l'utilisation des gaz d'inertage : ce risque biologique sur l'être humain est lié à l'absence transitoire ou définitive d'apport d'oxygène à une cellule, à un tissu ou à l'organisme entier. C'est pourquoi les milieux confinés exposés à ce risque doivent être dotés d'une analyse de la teneur en oxygène dans l'atmosphère et munis de mesures de protection, telles que la ventilation et le port d'appareils de protection respiratoire.

## 3.5 - Hydroxydes

Les hydroxydes (de potassium et de sodium) sont utilisés comme électrolytes pour l'électrolyse alcaline de l'eau.

### ■ 3.5.1 - Hydroxyde de potassium

L'hydroxyde de potassium, plus usuellement appelé potasse caustique ou simplement potasse, a pour formule KOH. C'est un composé chimique corrosif et basique. C'est également un produit très hygroscopique, autrement dit qui absorbe rapidement l'humidité de l'air ainsi que le dioxyde de carbone avec lequel il forme du carbonate de potassium. Ses caractéristiques physicochimiques sont fournies dans le tableau 22 en annexe (voir section 8.5).

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour caractériser les risques liés à l'hydroxyde de potassium :

- sa forte solubilité dans l'eau dégageant de la chaleur ;
- sa réactivité avec certains agents chimiques ;
- sa réactivité avec les métaux.

L'hydroxyde de potassium est très soluble dans l'eau. Sa dissolution s'accompagne d'un important dégagement de chaleur. Celle-ci doit donc être effectuée très progressivement, par petites quantités, en agitant pour limiter le dégagement de chaleur qui peut entraîner une vaporisation de l'eau accompagnée de violentes projections.

L'hydroxyde de potassium est une base forte qui réagit vigoureusement, en solution aqueuse, avec les acides et de nombreux composés organiques ou minéraux, comme les alcools de faible masse moléculaire, les acides forts, les anhydrides, les cétones, les dérivés nitrés, les peroxydes organiques. Les réactions peuvent être violentes, voire explosives. Il est donc recommandé de le stocker à l'écart des acides et autres produits incompatibles et d'éviter son contact avec la peau et les yeux (le produit est à manipuler avec des vêtements de protection, des gants et des lunettes de sécurité).

Les solutions aqueuses d'hydroxyde de potassium attaquent certains métaux, tels que l'aluminium, le zinc, l'étain, le plomb et leurs alliages, provoquant un dégagement d'hydrogène. En revanche, elles ne sont pas corrosives à température ambiante pour les aciers inoxydables, les aciers au carbone, la fonte ductile et quelques alliages spéciaux au nickel.

### ■ 3.5.2 - Hydroxyde de sodium

L'hydroxyde de sodium, plus usuellement appelé soude caustique ou simplement soude, a pour formule NaOH. C'est un solide blanc, inodore, très hygroscopique, déliquescent. Il est miscible à l'eau en toutes proportions, mais il se solidifie à 20 °C si la concentration dépasse 52 % massique. Ses caractéristiques physicochimiques sont fournies dans le tableau 23 en annexe (voir section 8.6). Dans le commerce, il est livré soit sous forme solide (blocs, écailles, grains, perles, poudre), soit sous forme de solution aqueuse de concentration variable.

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour caractériser les risques liés à l'hydroxyde de sodium :

- sa réactivité avec l'eau ;
- sa réactivité avec certains agents chimiques ;
- sa réactivité avec les métaux et plastiques.

La dissolution de l'hydroxyde de sodium dans l'eau s'accompagne d'une libération très importante de chaleur. Les solutions aqueuses libèrent également de la chaleur lorsqu'elles sont diluées : une solution à 40 % ou plus d'hydroxyde de sodium génère, lors de sa dilution dans l'eau, une grande quantité de chaleur portant la température au-delà du point d'ébullition, ce qui peut conduire à des projections sporadiques et incontrôlées de liquide corrosif.

L'hydroxyde de sodium est une base forte qui, en solution aqueuse très alcaline, réagit vigoureusement avec les acides. Ses réactions avec de nombreux composés organiques ou minéraux, tels que le phosphore, l'hydroquinone, le méthanol, le chloroforme, les acides forts, les chlorures d'acides, les anhydrides, les cétones et les glycols, peuvent être violentes, voire explosives.

La décomposition de l'hydroxyde de sodium à haute température conduit à la formation de fumées d'oxyde de sodium (Na<sub>2</sub>O).

Certains métaux, tels que l'aluminium, le zinc, l'étain, le plomb ainsi que le bronze et le laiton, sont attaqués par les solutions aqueuses d'hydroxyde de sodium avec dégagement d'hydrogène. Jusqu'à 65 °C, l'acier inoxydable n'est pas attaqué par ces solutions, quelle que soit leur concentration. Certains aciers spéciaux peuvent résister jusqu'à 90 °C. Les métaux qui résistent le mieux à l'action corrosive de l'hydroxyde de sodium en solution, même concentrée et à chaud, sont le nickel et quelques alliages spéciaux à base de nickel.

L'hydroxyde de sodium et ses solutions aqueuses attaquent certains plastiques, élastomères, revêtements, mais pas le Téflon ni les autres fluorocarbones, le polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène, le polyéthylène haute ou très haute densité.

### 3.6 - Hydrures

Trois principales familles d'hydrures peuvent être identifiées pour le stockage de l'hydrogène :

- les hydrures métalliques ( $MgH_2, \dots$ ) ;
- les hydrures complexes ( $NaAlH_4, LiAlH_4, NaBH_4, \dots$ ) ;
- les hydrures chimiques ( $NH_3BH_3, LiBH_4, \dots$ ).

Parmi ces trois familles, seules les hydrures métalliques à base de magnésium (Mg) et de titane-fer (Ti-Fe) sont commercialisés. Les hydrures chimiques et complexes sont encore au stade de la recherche. Les hydrures à base de magnésium présentent une capacité de stockage d'hydrogène autour de 7,7 % massique et une densité énergétique de 9 MJ/kg, la plus élevée parmi tous les hydrures utilisés pour le stockage d'hydrogène [5 : voir page 39].

Les hydrures peuvent être très réactifs à l'air ou à l'humidité, provoquant une réaction dégageant de la chaleur et de l'hydrogène. Par ailleurs, certains hydrures ont des propriétés de pyrophoricité, c'est-à-dire qu'ils

peuvent s'enflammer spontanément au contact de l'air. Dans le cadre d'un fonctionnement normal des systèmes de stockage par hydrures, de faibles quantités de poussières d'hydrures sont émises. Celles-ci restent normalement confinées dans l'enceinte du système (conteneur par exemple). En cas de rupture de l'enveloppe (suite à une agression extérieure ou à un dysfonctionnement interne), le rejet de ces poussières vers l'extérieur peut s'accompagner d'une inflammation. Par ailleurs, certains hydrures peuvent s'avérer toxiques.

De nouveaux types d'hydrures devraient être rapidement commercialisés. Les risques et recommandations liés à l'utilisation de ces matériaux doivent être mis à jour des savoirs, au fur et à mesure de leur développement.

### 3.7 - Synthèse

Le tableau 3 synthétise les principaux risques et incompatibilités avec des matériaux des différentes substances manipulées.

**TABLEAU 3 - SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RISQUES LIÉS AUX SUBSTANCES MANIPULÉES**

Nom	Hydrogène	Oxygène	Azote / argon	Hydroxyde de potassium et de sodium	Hydrure de magnésium
Formule chimique	$H_2$	$O_2$	$N_2 / Ar$	KOH, NaOH	$MgH_2$
Symbole					
Risques principaux	Feu Explosion	Feu et explosion (en présence de carburant)	Anoxie	Brûlure chimique	Dégagement de chaleur, voire inflammation spontanée en présence d'humidité
Incompatibilités, réactivité	Perméation / fragilisation des métaux et alliages	Réactivité avec les matériaux, les graisses et hydrocarbures		Réaction vive avec l'eau, réactivité avec les composés organiques ou minéraux, ainsi que certains métaux	Fragilisation des métaux et alliages

# 4 - Prévention, détection et contrôle des événements redoutés

Trois grands types d'événements sont à redouter, selon l'analyse préliminaire des risques conduite sur les trois exemples d'installation type : les fuites d'hydrogène à l'air ambiant, le mélange d'hydrogène et d'oxygène (pur ou contenu dans de l'air) au sein d'un équipement, et, enfin, la réaction d'hydrures avec de l'air ou de l'eau.

Pour chacune des causes identifiées, des moyens de maîtrise des risques sont proposés en sections 4.1 et 4.4, sur la base des pratiques actuelles des industriels de la filière et des recommandations de l'Ineris. Ces moyens sont de trois ordres : la prévention de l'événement à sa source, sa détection, son contrôle.

## 4.1 - Fuite d'hydrogène dans l'air ambiant

### ■ 4.1.1 - Événement redouté et conséquences

Une fuite d'hydrogène dans l'air ambiant est à redouter car elle peut mener à un mélange inflammable ou explosif d'hydrogène et d'air. Si le mélange hydrogène-air contient moins de 4 % d'hydrogène, celui-ci est suffisamment dilué dans l'air pour ne pas s'enflammer. Au-delà, selon le débit de fuite et la circulation de l'air ambiant, une fuite d'hydrogène peut mener aux phénomènes dangereux suivants :

- Un mélange hydrogène-air contenant entre 4 et 8 % d'hydrogène, il est alors fortement probable que l'hydrogène s'enflamme au contact d'une source d'inflammation.
- Un mélange hydrogène-air contenant plus de 8 % d'hydrogène, il est alors fortement probable que ce mélange produise une explosion au contact d'une source d'inflammation.

Le débit de fuite dépend de la taille de l'ouverture entre le milieu contenant l'hydrogène et l'air ambiant ainsi que de la pression de l'hydrogène. Plus la taille de l'ouverture est grande et plus la pression de l'hydrogène est élevée, plus le débit de fuite sera important.

La circulation naturelle de l'air ambiant dépend de l'environnement dans lequel a lieu la fuite. Dans un bâtiment ou un conteneur, la circulation naturelle d'air sera réduite et l'hydrogène aura tendance à s'accumuler en hauteur car il est plus léger que l'air. Ce phénomène d'accumulation peut facilement mener à un mélange suffisamment concentré en hydrogène pour générer une explosion au contact d'une source d'inflammation. La ventilation des espaces fermés est l'une des mesures permettant de prévenir la formation d'un mélange inflammable ou explosif.

Si une petite fuite a lieu en milieu extérieur, l'hydrogène peut se disperser à l'infini sans accumulation importante : le risque d'explosion est réduit.

### ■ 4.1.2 - Causes et moyens de prévention

Les fuites d'hydrogène vers l'air ambiant peuvent apparaître sur tout type d'équipement dont les parois sont exposées à l'air libre. Les raccords des canalisations et les vannes sont particulièrement concernés.

Les causes peuvent être réparties en quatre grandes catégories, indépendamment de leur localisation :

- Les fuites de perméation dues à la très petite taille des molécules d'hydrogène qui facilite la migration du gaz à travers les matériaux.
- Les fuites dues à l'usure progressive des matériaux (corrosion, fatigue mécanique).
- Les fuites dues à des défauts d'étanchéité des organes de raccordement ou d'instrumentation (bride, joint, soupape).
- Les fuites issues d'une rupture des parois d'un équipement due à une agression externe et soudaine mécanique, chimique ou thermique, ou encore à une surpression.

Les fuites de perméation ne peuvent pas être évitées, mais elles produisent des débits minimes. En milieu extérieur, elles ne présentent pas de danger et, en milieu intérieur, leurs conséquences peuvent facilement être maîtrisées (voir section 4.1.3).

Les autres types de fuites peuvent en revanche produire des débits importants et avoir des effets conséquents sur l'installation et sur son environnement. Elles doivent être évitées autant que possible en utilisant des moyens de prévention. Les fuites de rupture des parois d'un équipement génèrent en général des débits plus importants que les fuites d'usure ou de défaut d'étanchéité.

La corrosion et la fatigue mécanique sont les deux principales causes d'usure des matériaux métalliques contenant de l'hydrogène. La corrosion est une réaction chimique qui dégrade le matériau tandis que la fatigue mécanique est produite par les cycles de contrainte mécanique sur des équipements causés, par exemple, par des cycles de pressurisation-dépressurisation ou par des vibrations mécaniques auxquelles les équipements sont exposés. Il est possible de prévenir ces deux phénomènes en utilisant des matériaux adaptés à l'hydrogène et moins sensibles à la corrosion ou à la fatigue mécanique. Pour cela, il est recommandé de se référer au rapport technique ISO/TR 15916 « Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène ». Il est également recommandé de mettre en place une procédure de contrôle de la corrosion des matériaux contenant de l'hydrogène, tout au long de la durée de vie de l'installation, afin de remplacer les matériaux lorsque leur degré d'usure comporte un risque de fuite. Les solutions d'électrolytes alcalines peuvent également provoquer de la corrosion.

Les défauts d'étanchéité ont généralement lieu sur les raccords vissés. Ces éléments permettent de connecter des segments de tuyauterie tout en offrant la possibilité d'être montés et démontés durant la vie de l'installation, notamment lors des opérations de maintenance. En limitant le nombre de raccords vissés, on réduit directement le risque de défaut d'étanchéité. Il est donc préférable de privilégier des raccords soudés lorsque cela ne compromet pas l'exploitation et la maintenance des équipements. Dans ce cas, le choix des matériaux de soudure doit respecter les recommandations du rapport IGC Doc 121/04/E « Hydrogen Transportation Pipelines ». Cependant, l'utilisation de raccords vissés est inévitable pour certaines parties de l'installation, et il est alors nécessaire de respecter le protocole de montage du fournisseur.

Un défaut d'étanchéité sur un raccord vissé est généralement dû à une erreur de montage, lors de l'installation initiale des équipements ou lors des opérations de maintenance. Les raccords sont conçus pour être vissés à un couple imprimant une pression donnée, qui assure leur étanchéité. Si le raccord est vissé à un couple inférieur à celui de consigne, l'étanchéité ne sera pas garantie. Dans le cas où le raccord est vissé à un couple supérieur, l'étanchéité sera assurée

dans un premier temps, mais lors d'une opération de démontage-remontage, le raccord ne sera plus étanche. Pour prévenir ces risques de fuite, il est nécessaire de respecter les procédures de montage des installations qui préconisent notamment de mesurer le couple lors du vissage. Toutefois, le respect de cette procédure par l'installateur des équipements est difficilement contrôlable. Il est pour cela recommandé de tester l'étanchéité des raccords avant de démarrer l'installation. Le test d'étanchéité se fait avec un gaz inerte, comme l'hélium, circulant dans les équipements et canalisations et dont les fuites peuvent être détectées avec un instrument de mesure près des raccords vissés.

Les vibrations mécaniques que subissent les raccords vissés peuvent, au cours de l'exploitation de l'installation, les desserrer et affecter leur étanchéité. Une vérification périodique de la pression de vissage des raccords exposés à des vibrations mécaniques peut prévenir ce risque de fuite.

L'utilisation de flexibles n'est pas envisagée a priori sur les installations considérées dans ce guide, car ce type de tuyauteries est associé à une probabilité d'occurrence de fuite plus élevée que les tuyauteries rigides. Dans le cas où des flexibles seraient utilisés, il est nécessaire de mettre en œuvre du matériel éprouvé, d'effectuer un contrôle visuel fréquent des raccords et de remplacer les flexibles à intervalle régulier prédéfini, afin de réduire le risque de fuite.

Les ruptures de canalisation ou de paroi d'équipements peuvent avoir lieu lors de surpressions non contrôlées, lors d'agressions externes (mécanique, chimique ou thermique) ou à cause d'une fragilisation pour les matériaux non adaptés. Les problématiques de surpression ne sont pas spécifiques à l'hydrogène et sont bien connues et documentées dans l'industrie et les références normatives. L'application des normes en vigueur, notamment issues de la directive 97/23/CE (relative aux équipements sous pression), constitue le moyen de prévention le plus efficace contre les surpressions. Les agressions externes pouvant provoquer la rupture d'une canalisation ou de la paroi d'un équipement sont d'ordre mécanique (collision avec un véhicule ou un équipement en mouvement), chimique (exposition de la surface extérieure à une substance corrosive) ou thermique (contact avec une matière incandescente). Ce type de risque est transverse à toute application industrielle mettant en œuvre un produit dangereux ; il n'est pas spécifique à l'hydrogène. La prévention des agressions extérieures passe par la mise en place de procédures de sécurité liées aux activités menées à proximité des équipements (périmètre de sécurité, procédures d'arrêt lors de travaux, etc.).

De façon générale, les matériaux polymères doivent être évités pour les canalisations d'hydrogène, car ils sont peu résistants aux agressions thermiques et physiques. Un tube en matériau polymère peut rompre rapidement lors d'une fuite enflammée sur la ligne. Dans le cas où une canalisation en polymère est utilisée, il est nécessaire de s'assurer que les éléments en aval de la canalisation ne délivreront pas un débit d'hydrogène trop important

et pouvant créer une rupture par effet de surpression. Cette précaution peut par exemple être mise en place avec un limiteur de débit ou un orifice calibré situé en amont de la canalisation en plastique.

Le tableau 4 récapitule les causes de fuites d'hydrogène dans l'air ambiant, leur localisation sur les installations et les moyens de prévention pour les éviter.

**TABLEAU 4 - CAUSES ET MOYENS DE PRÉVENTION DES FUITES D'HYDROGÈNE DANS L'AIR AMBIANT**

Fuite d'hydrogène dans l'air ambiant		
Cause	Localisation	Moyen de prévention
<b>Perméation (débit minime)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Taille des molécules d'hydrogène</li> </ul>	Tout équipement contenant de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour les réservoirs : revêtements polymères anti-perméation (ex. : revêtements des réservoirs de type IV)</li> </ul>
<b>Usure (débit modéré)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Corrosion</li> <li>Fatigue mécanique</li> </ul>	Tout équipement contenant de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Choix des matériaux adaptés pour l'hydrogène (selon ISO/TR 15916) et pour l'hydroxyde</li> <li>Maintenance préventive, vérifications périodiques et programme d'inspections pour contrôler l'état d'usure</li> <li>Prévention des vibrations et des cycles de contraintes</li> </ul>
<b>Défaut d'étanchéité (débit modéré)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Raccords vissés trop ou pas assez fort</li> <li>Vibrations mécaniques sur raccords vissés</li> </ul>	Tout équipement contenant de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Privilégier si possible les raccords soudés aux raccords vissés</li> <li>Respect des procédures de montage-démontage des raccords mesure de la pression de vissage et test d'étanchéité)</li> <li>Vérification périodique du couple de vissage des raccords vissés exposés aux vibrations mécaniques</li> </ul>
<b>Rupture (grand débit)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Surpressions</li> <li>Agression mécanique externe</li> </ul>	Tout équipement contenant de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Application des normes et directives liées aux équipements sous pression</li> <li>Procédures de sécurité sur la circulation des véhicules</li> <li>Procédures pour encadrer les opérations de maintenance et travaux</li> </ul>

### 4.1.3 - Moyens de détection et de contrôle

Les moyens à utiliser pour la détection et le contrôle des fuites d'hydrogène ne sont pas les mêmes selon le niveau de débit en jeu et si la fuite a lieu en intérieur ou en extérieur.

Pour les fuites de débit minime, par exemple les fuites par perméation, la détection est très difficile. En milieu extérieur cependant, l'hydrogène est automatiquement dilué dans l'air libre environnant sans former de mélange inflammable ou explosif. En milieu confiné, il est nécessaire de doter l'enceinte (bâtiment ou conteneur) d'une ventilation adaptée pour diluer et évacuer l'hydrogène vers l'extérieur, afin qu'il ne s'accumule pas et que sa teneur dans l'air reste inférieure à la LIE. Des ouvertures vers l'extérieur et en hauteur permettent par exemple de générer une bonne ventilation et d'éviter l'accumulation d'hydrogène à l'intérieur du conteneur. L'intensité de ventilation doit être adaptée au taux de fuite par perméation qui dépend des équipements et des niveaux de pression mis en œuvre.

Des capteurs mesurant la concentration d'hydrogène dans l'air peuvent être utilisés en milieu intérieur pour détecter les fuites de débit modéré ne pouvant pas être évacuées par la ventilation naturelle de l'enceinte. Ces capteurs doivent alors être reliés à un système de ventilation forcée, activé en cas de détection d'une concentration trop importante d'hydrogène, et assurant un débit de ventilation plus important qu'une ventilation naturelle. Il est recommandé de positionner les capteurs en hauteur et à proximité des sources de fuites prévisibles, car l'hydrogène est plus léger que l'air et s'accumule en haut des enceintes fermées.

Dans le cas d'équipements installés dans des conteneurs, un capteur doit être placé dans chaque conteneur, son état de fonctionnement et son calibrage doivent être vérifiés périodiquement. La norme NF EN 60079 « Atmosphères explosives - Partie 29-2 » délivre des recommandations quant à l'emplacement de ce type de capteur. L'alimentation électrique de la ventilation forcée doit être doublée d'un système de secours en cas de défaut d'alimentation principale.

L'indisponibilité du système de ventilation forcée doit automatiquement déclencher une alarme ainsi que l'arrêt de l'électrolyseur, voire de l'ensemble de l'installation, jusqu'à sa remise en état de fonctionnement.

Pour les fuites de grand débit, qu'elles soient en intérieur ou en extérieur, il est préférable d'assurer une détection quasi instantanée avec une mesure de pression dans les équipements contenant de l'hydrogène. Une rupture de canalisation ou de paroi d'équipement provoque une chute de pression brutale et facilement détectable. Ainsi, les mesures de contrôle peuvent être mises en place au plus vite pour contenir la fuite.

La détection d'une fuite en milieu intérieur doit automatiquement déclencher un système de ventilation forcée qui dilue et évacue l'hydrogène libéré dans l'enceinte. Le ventilateur doit être conforme aux spécifications Atex, étant donné qu'il sera potentiellement exposé à un mélange gazeux explosif.

La détection de fuites de grand débit, quel que soit le milieu dans lequel a lieu la fuite (intérieur ou extérieur), doit automatiquement déclencher une dépressurisation de l'installation. Si la fuite peut être localisée, la dépressurisation peut être limitée aux équipements en jeu, à condition de pouvoir les isoler du reste de l'installation par la fermeture de vannes aux interfaces.

Si la fuite n'est pas localisée ou que les équipements ne peuvent pas être isolés, l'ensemble de l'installation doit être dépressurisé.

La dépressurisation du système permet de stopper rapidement les fuites. Pour les fuites de débit élevé dues à une rupture de la canalisation de transfert d'hydrogène, la détection d'une chute de pression doit déclencher la fermeture automatique des vannes en sortie de production et en entrée de ligne de transfert vers le stockage, afin de limiter la quantité d'hydrogène relâchée.

La détection de fuite de faible débit en extérieur est délicate car les capteurs d'hydrogène ne sont pas appropriés. L'utilisation de détecteurs de flamme est une solution de dernier recours, au cas où une fuite ait lieu sans avoir été détectée et qu'elle conduise à un incendie. Des détecteurs spécifiques sensibles aux ultraviolets doivent être utilisés pour les flammes d'hydrogène, car celles-ci n'émettent que très peu d'infrarouges. Ces détecteurs sont encore en cours d'amélioration, car leur fiabilité est discutée. Les pratiques en matière de détection de flamme peuvent donc varier selon les cas de figure.

Le tableau 5 récapitule les moyens de détection et de contrôle des fuites d'hydrogène dans l'air ambiant.

**TABLEAU 5 - MOYENS DE DÉTECTION ET DE CONTRÔLE DISPONIBLES POUR LES FUITES D'HYDROGÈNE DANS L'AIR AMBIANT**

Moyens de détection et de contrôle des fuites d'hydrogène dans l'air ambiant		
Type de fuite	Moyen de détection	Moyen de contrôle
Perméation d'hydrogène en milieu confiné	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aucun (non nécessaire)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ventilation naturelle de l'enceinte</li> </ul>
Perméation d'hydrogène en milieu extérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aucun (non nécessaire)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aucun (non nécessaire)</li> </ul>
Débit modéré en milieu confiné	<ul style="list-style-type: none"> <li>Détecteur d'hydrogène dans l'air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ventilation forcée de l'enceinte</li> <li>Dépressurisation isolée ou globale</li> </ul>
Débit modéré en milieu extérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Détecteur de flamme d'hydrogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépressurisation isolée ou globale</li> </ul>
Débit élevé en milieu confiné	<ul style="list-style-type: none"> <li>Détecteur d'hydrogène dans l'air</li> <li>Mesure de pression sur la ligne d'hydrogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépressurisation isolée ou globale</li> <li>Fermeture automatique de la vanne en entrée de ligne de transfert d'hydrogène</li> </ul>
Débit élevé en milieu extérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de pression sur la ligne d'hydrogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépressurisation isolée ou globale</li> <li>Fermeture automatique de la vanne en entrée de ligne de transfert d'hydrogène</li> </ul>

## 4.2 - Formation d'un mélange hydrogène-oxygène ou hydrogène-air dans les équipements

### ■ 4.2.1 - Événement redouté et conséquences

Qu'il soit de type alcalin ou PEM, un électrolyseur est constitué de cellules d'électrolyse qui produisent de l'hydrogène et de l'oxygène dans des compartiments séparés par un diaphragme ou une membrane (voir la description des technologies en section 2.1.1).

La formation d'un mélange hydrogène-oxygène dans les équipements peut résulter d'un transfert excessif d'hydrogène dans le compartiment de l'électrolyseur contenant de l'oxygène. La formation d'un mélange hydrogène-air peut résulter d'une infiltration d'air dans les parties de l'installation contenant de l'hydrogène.

Bien que les deux compartiments soient séparés, l'oxygène produit contient systématiquement un peu d'hydrogène, et inversement. En fonctionnement normal, ces concentrations de mélange sont très faibles et ne représentent pas un risque. L'oxygène présent dans le compartiment hydrogène est par ailleurs neutralisé dans les étapes de purification d'hydrogène. Cependant, certains dysfonctionnements ou événements peuvent provoquer une diffusion excessive d'hydrogène dans le compartiment contenant de l'oxygène et former un mélange explosif. En effet, la pression à l'intérieur du compartiment hydrogène est, dans certaines configurations, plus élevée que celle à l'intérieur du compartiment oxygène. Si l'étanchéité entre les deux compartiments n'est plus garantie, l'hydrogène risque donc de migrer vers l'oxygène.

Un mélange explosif peut également être formé si de l'air extérieur s'infiltré dans le compartiment de l'électrolyseur contenant de l'hydrogène, lorsque l'équipement est dépressurisé.

### ■ 4.2.2 - Causes et moyens de prévention

La diffusion d'hydrogène dans le compartiment oxygène de l'électrolyseur peut survenir selon trois grands types de causes :

- Une fuite progressive par usure de la membrane ou du diaphragme d'une cellule d'électrolyse (technologie alcaline et PEM).
- Une fuite brutale lors de la rupture de la membrane d'une cellule d'électrolyse due, par exemple, à sa surchauffe (technologie PEM).
- Un transfert d'hydrogène dans le compartiment oxygène en aval des cellules d'électrolyse dû à une mauvaise gestion des équilibres de pression ou à des communications entre les tuyauteries des deux compartiments.

Les membranes et diaphragmes assurent l'étanchéité gazeuse et liquide entre les deux compartiments des cellules d'électrolyse. Ces parties sont toutefois soumises à un phénomène d'usure dû par exemple à l'abrasion et aux contraintes thermiques qui peuvent créer des pertes d'étanchéité et provoquer une diffusion d'hydrogène vers le compartiment oxygène. Pour prévenir ce phénomène, les membranes et diaphragmes doivent être remplacés selon un calendrier prévisionnel d'usure délivré par le fournisseur de l'équipement.

Les membranes sont soumises à un courant électrique et peuvent rompre en cas de surchauffe, ce qui conduit à la diffusion brutale d'hydrogène dans le compartiment oxygène. La surchauffe peut être provoquée par un encrassement dû au dépôt de calcaire contenu dans l'eau d'électrolyse si celle-ci n'est pas suffisamment déminéralisée. La mesure périodique de la résistance électrique d'une cellule d'électrolyse permet d'identifier un dysfonctionnement de la membrane. Il est techniquement complexe de positionner un capteur de résistance en continu sur chaque cellule. En revanche, cette mesure peut être faite lors des périodes de maintenance. Un autre motif de surchauffe est le dysfonctionnement du système de refroidissement. L'eau qui circule dans les cellules d'électrolyse est refroidie avant chaque passage pour maintenir une température acceptable. Il est donc recommandé de contrôler en continu la température des empilements. La détection d'une température trop élevée ou d'un défaut d'alimentation en eau impose l'arrêt de l'électrolyseur.

De façon générale il est recommandé de contrôler la qualité de l'eau d'électrolyse, afin de réduire le risque d'encrassement des équipements en contact (membranes, diaphragmes, tuyauterie, clapet antiretour, etc.), et ainsi réduire le risque de surchauffe et de rupture des membranes et diaphragmes.

La réaction d'électrolyse de l'eau peut produire une surpression côté hydrogène (voir description de l'électrolyseur en section 2.1.1). Un transfert régulier d'eau entre les deux réservoirs séparateurs assure un équilibrage des niveaux entre les deux sections de l'électrolyseur. Dans le cas de l'électrolyse alcaline, le transfert d'électrolyte liquide permet également d'équilibrer la concentration ionique dans les deux sections. Les deux réservoirs séparateurs sont donc connectés à travers une ligne de transfert d'eau.

L'étanchéité gazeuse (hydrogène-oxygène) entre les deux sections peut être assurée par le volume d'eau venant de la section hydrogène, par des vannes ou par des clapets antiretour. Dans le cas où c'est le volume d'eau qui assure l'étanchéité, il est nécessaire de mesurer en continu le niveau d'eau dans chacun des réservoirs séparateurs et de mettre en place une boucle de pilotage de transfert d'eau dépendant de ces mesures de niveau, afin, notamment, de compenser la consommation d'eau par l'électrolyse. Un système assurant un arrêt d'urgence en cas de différence de niveau ou de pression entre les deux compartiments ou de niveau d'eau insuffisant est également nécessaire, afin d'éviter la mise en contact accidentelle des gaz.

Dans le cas où la boucle de pilotage (capteurs de niveau, vannes, pompe) fait défaut, il est possible que de l'hydrogène migre depuis le compartiment hydrogène vers le compartiment oxygène. Afin de prévenir ce phénomène, il est recommandé d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble des capteurs impliqués, notamment avec un étalonnage régulier et un fonctionnement seulement dans leur gamme de température. Par ailleurs, certains organes de contrôle-commande, tels que les pompes, vannes et les clapets antiretour, peuvent être exposés à un risque d'encrassement ou d'obstruction. Il est nécessaire de vérifier leur état régulièrement. Des retours d'expérience indiquent également que les événements peuvent se boucher par invasion de corps étrangers venant de l'extérieur, comme des insectes. Ils doivent pour cela être contrôlés régulièrement.

Dans le cas des électrolyseurs PEM, les connexions entre les compartiments hydrogène et oxygène doivent être évitées autant que possible, lors de la conception de l'électrolyseur. Pour les électrolyseurs impliquant de grands volumes dans les séparateurs, l'inertage au cours des phases d'arrêt permet de réduire significativement

le risque de formation d'une atmosphère explosive. Le système d'inertage, s'il est commun, peut être une source de communication entre les compartiments. Il est préférable d'utiliser, dans la mesure du possible, deux lignes d'inertage distinctes et deux lignes d'alimentation en eau distinctes pour chaque séparateur, afin d'éviter tout risque lié à une communication entre les compartiments hydrogène et oxygène. De même, le refroidissement d'hydrogène et d'oxygène peut se faire avec le même échangeur thermique, ou encore avec le même circuit de refroidissement, ce qui, en cas de fuite, pourrait créer un mélange hydrogène-oxygène. Tout comme pour l'inertage, une bonne pratique de conception consiste à utiliser deux échangeurs et, si possible, deux circuits de refroidissement séparés. Dans la même philosophie, les conduits d'évacuation de l'hydrogène et de l'oxygène vers les événements doivent être séparés, et les rejets à l'air extérieur doivent être suffisamment éloignés l'un de l'autre pour éviter toute formation d'un mélange explosif en extérieur.

Les principales causes d'infiltration d'air dans les équipements contenant de l'hydrogène sont :

- L'infiltration d'air par erreur lors de l'application des procédures de démarrage ou d'opération.
- L'infiltration d'air à l'aspiration du compresseur s'il n'est pas alimenté en hydrogène.

Le scénario le plus probable de formation d'un mélange hydrogène-air dans les équipements par erreur de procédure est lié à un défaut d'inertage. Lorsque l'installation est à l'arrêt ou lorsqu'elle est dépressurisée, de l'air extérieur peut s'y infiltrer. Ce phénomène peut être évité par la mise en place d'une procédure de dépressurisation intégrant des mesures pour garantir l'étanchéité de l'installation aux infiltrations d'air extérieur, comme l'isolement des sections exposées aux infiltrations d'air par la fermeture de vannes manuelles. Dans le cas où des parties de l'installation ont été exposées aux infiltrations d'air, elles devront être inertées avec un gaz comme l'azote avant de redémarrer la production d'hydrogène.

L'aspiration des compresseurs est une zone particulièrement exposée à l'infiltration d'air extérieur dans le cas où l'alimentation en hydrogène est bloquée par une vanne en position fermée par exemple. En effet, si un compresseur fonctionne et que son aspiration est bloquée, un vide est créé à l'aspiration, et de l'air peut s'infiltrer. Afin d'éviter ce scénario, le démarrage et le fonctionnement du compresseur doivent être asservis à un seuil minimum de pression à son aspiration. Il est donc recommandé de positionner un pressostat à l'aspiration du compresseur et de relier la mesure de pression au contrôle commande des compresseurs.

Le tableau 6 récapitule les causes de mélange hydrogène-oxygène dans les équipements, leur localisation et les moyens de prévention.

**TABLEAU 6 - CAUSES ET MOYENS DE PRÉVENTION DES MÉLANGES H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> À L'INTÉRIEUR DES ÉQUIPEMENTS**

Formation d'un mélange H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> dans les équipements		
Cause	Localisation	Moyen de prévention
<b>Fuite progressive par usure d'une membrane ou d'un diaphragme</b>	Cellules d'électrolyse (alcaline et PEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remplacement périodique des membranes et diaphragme selon le calendrier prévisionnel d'usure du fournisseur</li> </ul>
<b>Rupture d'une membrane par :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Surchauffe</li> <li>Encrassement</li> <li>Défaut de refroidissement de l'eau</li> <li>Déséquilibre de pression</li> <li>Défaut de régulation de pression</li> <li>Bouchage d'un évent</li> </ul>	Cellules d'électrolyse (alcaline et PEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrôle continu ou périodique de la qualité de l'eau d'alimentation de l'électrolyseur</li> <li>Mesure de la température des empilements, contrôle du niveau d'alimentation en eau dans l'électrolyseur (mesure du débit d'eau) avec un seuil et une alarme déclenchant l'arrêt de l'électrolyseur en cas de risque de surchauffe</li> <li>Mesure périodique de la résistance des cellules d'électrolyse pour détecter une surchauffe</li> <li>Contrôle régulier du bon fonctionnement des événements</li> <li>Mesure de la pression différentielle entre les compartiments H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> </ul>
<b>Transfert d'H<sub>2</sub> dans le compartiment O<sub>2</sub> en aval des cellules d'électrolyse</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Défaillance de la boucle de pilotage</li> <li>Communication des deux compartiments par la ligne d'inertage ou d'eau</li> <li>Fuite dans un échangeur thermique commun ou utilisant le même fluide de refroidissement pour les compartiments H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> </ul>	Compartiments H <sub>2</sub> et O <sub>2</sub> de l'électrolyseur en aval des cellules d'électrolyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>Isoler et cloisonner autant que possible les compartiments H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> (lignes d'inertage et alimentation en eau indépendantes pour les deux compartiments, rejets d'H<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à l'air libre avec deux lignes et deux événements distincts positionnés avec une distance suffisante pour éviter un mélange des deux gaz à l'air libre)</li> <li>Procédures de contrôle de la fiabilité de la boucle de pilotage (étalonnage des capteurs et fonctionnement dans les limites de leur plage de température, contrôle de l'encrassement et de l'obstruction des vannes et clapets antiretour)</li> </ul>

Le tableau 7 récapitule les causes de mélange hydrogène-air dans les équipements, leur localisation et les moyens de prévention.

**TABLEAU 7 - CAUSES ET MOYENS DE PRÉVENTION DES MÉLANGES H<sub>2</sub>-AIR À L'INTÉRIEUR DES ÉQUIPEMENTS**

Formation d'un mélange H <sub>2</sub> -air dans les équipements		
Cause	Localisation	Moyen de prévention
<b>Infiltration d'air par erreur de procédure</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Démarrage sans inertage préalable</li> <li>Erreur de procédure de dépressurisation</li> </ul>	Tout équipement contenant de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procédures de démarrage et de dépressurisation (contrôle de la position des vannes au démarrage, purge des parties exposées à une infiltration d'air lors d'un arrêt)</li> </ul>
<b>Infiltration d'air à l'aspiration du compresseur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vanne fermée sur la ligne hydrogène en amont du compresseur</li> </ul>	Compresseur d'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de la pression à l'aspiration du compresseur asservie au démarrage du compresseur à un niveau de pression minimum pour garantir l'étanchéité du système</li> </ul>

### ■ 4.2.3 - Moyens de détection et de contrôle

La mesure de la concentration en hydrogène dans le compartiment oxygène de l'électrolyseur est un moyen de détection des fuites progressives d'hydrogène par usure des membranes ou diaphragmes de l'électrolyse. Ce moyen de détection n'est pas systématiquement utilisé : cela dépend des recommandations propres à l'installation. Une détection de la présence d'hydrogène dans le compartiment oxygène peut également être utile dans le cas d'une rupture de membrane ou de diaphragme.

Toutefois, il existe un autre moyen de détection plus rapide : la mesure de la pression côté hydrogène et oxygène pour détecter une anomalie, telle qu'une rupture de membrane ou de diaphragme, celle-ci causant immédiatement une chute de pression dans le compartiment hydrogène. Ce phénomène est détectable instantanément lors de la rupture tandis que la mesure de la présence d'hydrogène dans le compartiment oxygène est réalisée en aval du réservoir-séparateur, ce qui rallonge le délai de détection d'un mélange explosif hydrogène-oxygène.

Les anomalies sur le contrôle commande de l'électrolyseur (instrumentation, automate) peuvent également être détectées instantanément.

Par ailleurs, une surtension dans les cellules d'électrolyse, synonyme d'une potentielle rupture de membrane, peut être détectée par la mesure de la puissance électrique consommée aux bornes des empilements.

Cette méthode de mesure comporte toutefois un léger délai entre la rupture de la membrane et la détection de la surtension.

Dans le cas où de l'oxygène migre vers le compartiment hydrogène, sa présence excessive dans l'hydrogène peut être détectée par la mesure de la température au recombineur catalytique de l'unité de purification d'hydrogène. Cette unité vise à détruire l'oxygène présent en très faible quantité dans l'hydrogène produit en sortie de réservoir séparateur. La réaction de recombinaison hydrogène-oxygène mise en œuvre dans cette unité de purification produit de la chaleur. Le niveau de température du flux d'hydrogène en sortie d'unité indique ainsi le niveau de concentration en oxygène dans l'hydrogène. Un seuil critique de température peut donc être assimilé à une concentration en oxygène supérieure à la normale.

Dans le cas du mélange hydrogène-oxygène, l'énergie minimale d'inflammation est si faible qu'il est nécessaire de dépressuriser l'électrolyseur dès qu'un risque de mélange est détecté et de purger les compartiments exposés au risque de mélange. La purge de chaque compartiment se fait par la partie basse des séparateurs. Le gaz inerte bulle dans les séparateurs et chasse le mélange hydrogène-oxygène de chacune des deux lignes. Les cellules d'électrolyse sont automatiquement purgées par la quantité d'eau circulant encore dans l'électrolyseur pendant le délai de dépressurisation.

Le tableau 8 récapitule les moyens de détection et de contrôle des fuites d'hydrogène dans les équipements.

**TABLEAU 8 - MOYENS DE DÉTECTION ET DE CONTRÔLE POUR LES MÉLANGES H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> ET H<sub>2</sub>-AIR DANS LES ÉQUIPEMENTS**

Moyens de détection et de contrôle des fuites d'hydrogène dans les équipements		
Cause	Moyen de détection	Moyen de contrôle
Fuite progressive par usure d'une membrane ou d'un diaphragme	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de la concentration d'H<sub>2</sub> dans le compartiment O<sub>2</sub></li> <li>Mesure de la puissance électrique consommée aux bornes des empilements de l'électrolyseur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépressurisation et purge de l'installation</li> </ul>
Rupture de membrane ou diaphragme	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de la puissance électrique consommée aux bornes des empilements de l'électrolyseur</li> <li>Mesure de pression côté hydrogène</li> <li>Mesure de la pression différentielle entre les compartiments H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> <li>Mesure de la concentration d'H<sub>2</sub> dans le compartiment O<sub>2</sub></li> </ul>	
Défaillance du système de contrôle commande	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anomalie sur le contrôle commande</li> </ul>	
Infiltration d'air dans le compartiment hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de la température au recombineur catalytique d'H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> </ul>	

## 4.3 - Exposition des hydrures à l'air et à l'eau

### ■ 4.3.1 - Événement redouté et conséquences

En contact avec de l'air ou de l'humidité, les hydrures peuvent réagir et produire de l'hydrogène et de la chaleur. Par ailleurs, certains hydrures ont des propriétés de pyrophoricité, c'est-à-dire qu'ils peuvent s'enflammer spontanément au contact de l'air.

Cette forte réactivité à l'air et à l'eau peut conduire à des incendies, voire à des explosions dans l'unité de stockage d'hydrogène. Les incendies peuvent se propager rapidement si les hydrures sont relâchés vers l'extérieur ou vers d'autres sections de l'installation.

### ■ 4.3.2 - Causes et moyens de prévention

Il existe deux grands types d'exposition des hydrures à l'air ou à l'eau : la présence d'air ou d'eau dans le réservoir et la rupture mécanique du réservoir conduisant à une mise en contact soudaine des hydrures avec l'air ambiant.

Lors de la phase de déstockage d'hydrogène, le réservoir est chauffé pour alimenter la réaction de désorption de l'hydrogène contenu dans les hydrures. Si le système de chauffage fait défaut, la réaction de désorption s'interrompt automatiquement avec la baisse de température au sein du réservoir. Cette baisse de température peut créer l'absorption par les hydrures du volume d'hydrogène gazeux présent dans le réservoir et, en conséquence, générer un vide dans le réservoir. De l'air ambiant peut alors s'y infiltrer si le réservoir n'est pas étanche au vide, exposant directement les hydrures à l'air et à l'humidité qu'il contient. Un premier moyen de prévention est de mesurer la pression du réservoir et, si besoin, de rééquilibrer la pression interne du réservoir avec la pression externe ambiante en injectant un gaz inerte. Le type de gaz inerte est choisi selon le type d'hydrure utilisé pour garantir sa non-réactivité. Dans le cas où l'injection de gaz inerte fait défaut, une deuxième mesure de prévention consiste à assurer l'étanchéité du réservoir au vide. En effet, le réservoir comporte au minimum une ouverture vers l'extérieur avec une soupape qui permet de gérer les surpressions.

Il est donc nécessaire d'utiliser une soupape dont l'étanchéité au vide est garantie, ou bien de positionner un disque de rupture en aval de la soupape, afin d'assurer cette fonction. Ce disque de rupture devra être remplacé après chaque déclenchement de la soupape de sécurité.

Les hydrures peuvent être exposés à l'eau si l'unité de séchage d'hydrogène en sortie d'électrolyse est défaillante. La mesure de la teneur en eau de l'hydrogène en sortie d'électrolyseur permet de maîtriser ce risque. Dans le cas où l'hydrogène produit est stocké dans un volume tampon avant d'être injecté dans le réservoir d'hydrures, cette mesure représente un moyen de prévention (l'hydrogène n'étant alors pas encore injecté dans le réservoir d'hydrures). En revanche, en l'absence de volume tampon, la mesure de la teneur en eau de l'hydrogène fait office de moyen de détection, mais pas de prévention (voir section 4.3.3). Un tel dispositif peut cependant permettre d'arrêter rapidement l'injection, et de limiter ainsi les conséquences de la contamination.

Le phénomène cyclique d'absorption et de désorption d'hydrogène sur les hydrures provoque l'augmentation progressive du volume des matériaux. Si les dimensions du réservoir n'intègrent pas ce phénomène, les parois peuvent être déformées, voire rompre sous l'effet mécanique de la dilatation des hydrures. Une telle rupture exposerait automatiquement les hydrures à l'air ambiant et à son humidité. Il est donc nécessaire d'anticiper le phénomène de dilatation due aux hydrures, dès la conception du réservoir. Un programme de contrôle régulier de l'intégrité du réservoir doit également être mis en place, afin de détecter tout signe avant-coureur de rupture (fissuration, déformation anormale).

Un effet de surpression non contrôlée dans le réservoir d'hydrures peut provoquer l'explosion du réservoir et exposer les hydrures à l'air ambiant. Il est donc nécessaire de gérer ces surpressions potentielles. Une soupape reliée à un évacuateur permet d'assurer cette fonction. Toutefois, ce système doit pouvoir également garantir l'étanchéité du réservoir au vide, comme décrit précédemment.

Le tableau 9 récapitule les causes, leur localisation et les moyens de prévention.

**TABLEAU 9 - CAUSES ET MOYENS DE PRÉVENTION D'UNE EXPOSITION DES HYDRURES À L'AIR OU L'EAU**

Exposition des hydrures à l'air et à l'eau		
Cause	Localisation	Moyen de prévention
<b>Infiltration d'air extérieur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Dépression dans le réservoir en phase de déstockage due à la réabsorption de l'hydrogène (défaillance du système de chauffage)</li> </ul>	Réservoir d'hydrures	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de la pression avec seuil et alarme associés aux dépressions. Injection de gaz inerte pour rééquilibrer la pression si nécessaire</li> <li>Utilisation de soupapes étanches à l'infiltration d'air ou d'un disque de rupture en aval des soupapes</li> </ul>
<b>Présence d'eau dans l'hydrogène</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Défaillance de l'unité de séchage d'hydrogène</li> </ul>	Réservoir d'hydrures	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure continue de la teneur en eau dans l'hydrogène</li> </ul>
<b>Exposition des hydrures à l'air ambiant</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rupture mécanique du réservoir par déformation progressive</li> </ul>	Réservoir d'hydrures	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conception d'un réservoir adapté aux contraintes résultant des cycles thermiques d'absorption-désorption</li> <li>Contrôle régulier de l'intégrité physique du réservoir</li> </ul>
<b>Explosion du réservoir</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Effet de surpression</li> </ul>	Réservoir d'hydrures	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soupape de sécurité reliée à un évent. Le dispositif doit être étanche aux infiltrations d'air en cas de dépression dans le réservoir. Si la soupape n'est pas étanche, un disque de rupture peut être positionné en aval</li> </ul>

### 4.3.3 - Moyens de détection et de contrôle

Le réservoir d'hydrures est muni d'une mesure de température et de pression pour la régulation du système de chauffe en phase de déstockage et de refroidissement en phase de stockage. La mesure de pression doit être associée à des niveaux haut et bas d'alarme qui correspondent à un risque de surpression, et de dépression, hors des plages normales de fonctionnement de l'unité. Par ailleurs, la mesure de température peut permettre de détecter des

phénomènes anormaux et inattendus dans le réservoir. Il est donc intéressant de l'associer également à des niveaux hauts et bas, en dehors des plages normales de fonctionnement de l'unité.

Dès qu'une alarme de détection est déclenchée (pression, température, teneur en eau dans l'hydrogène), le réservoir d'hydrures doit être isolé des autres parties de l'installation et purgé avec un gaz inerte.

Le tableau 10 récapitule les moyens de détection et de contrôle.

**TABLEAU 10 - MOYENS DE DÉTECTION ET DE CONTRÔLE D'UNE EXPOSITION DES HYDRURES À L'AIR OU À L'EAU**

Moyens de détection et de contrôle de l'exposition des hydrures à l'air et à l'eau		
Cause	Moyen de détection	Moyen de contrôle
<b>Infiltration d'air extérieur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de pression et de la température dans le réservoir d'hydrures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Isolation et inertage du réservoir d'hydrures</li> </ul>
<b>Exposition des hydrures à l'air ambiant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure de la température dans le réservoir d'hydrures</li> </ul>	
<b>Présence d'eau dans l'hydrogène</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyse des impuretés (principalement l'eau) dans l'hydrogène à l'entrée du réservoir d'hydrures</li> </ul>	

## 4.4 - Autres éléments spécifiques aux technologies utilisées

### ■ 4.4.1 - Risque de gel

Selon les conditions météorologiques de la zone dans laquelle est située l'installation, celle-ci peut être exposée à des températures extérieures inférieures à 0 °C. Les équipements contenant de l'eau sont alors exposés à un risque de gel, lors des phases d'opération où l'électrolyseur est en stand-by : il ne produit pas d'hydrogène, mais il est maintenu sous pression et les lignes hydrogène et oxygène contiennent des gaz. Le gel de l'eau peut produire une perte de confinement des équipements et tuyauteries concernées, notamment des deux réservoirs séparateurs et du réservoir d'eau déminéralisée. Si, de ce fait, de l'hydrogène est en contact avec de l'air ou de l'oxygène, le mélange risque de s'enflammer ou d'exploser. Pour prévenir le gel dans les cas de figure où il menace l'électrolyseur, il est recommandé d'utiliser un système de chauffage du conteneur ou du bâtiment contenant l'électrolyseur, afin de maintenir une température minimum.

### ■ 4.4.2 - Diffusion de poudres d'hydrures dans les équipements

Au fur et à mesure des cycles d'absorption et de désorption, les hydrures peuvent produire de fines poudres qui risquent de se diffuser en aval du réservoir d'hydrures. Il est alors nécessaire de garantir par un système ad hoc que ces poudres n'endommagent pas les équipements en aval et ne perturbent pas le bon fonctionnement de l'installation. On peut par exemple utiliser un filtre en sortie de réservoir d'hydrures avec un décolmatage périodique ou déclenché par une mesure de pression relative en amont et en aval du filtre, pour détecter son niveau d'encrassement. Pour éviter l'exposition de la poudre à l'air lors du décolmatage, celle-ci sera maintenue dans le réservoir d'hydrure (décolmatage par contre-pression).

## 4.5 - Rappel de bonnes pratiques générales

Les bonnes pratiques de sécurité recouvrent les moyens de prévention, de détection et de contrôle des phénomènes dangereux spécifiques à l'hydrogène évoqués dans les sections 4.1, 4.2 et 4.3, mais également les mesures de sécurité transverses aux installations industrielles ou manipulant des gaz.

Certaines de ces bonnes pratiques générales sont rappelées de façon non exhaustive ci-dessous.

- Les risques liés aux surpressions doivent faire l'objet de mesures de prévention et de détection conformément à l'état de l'art normatif et réglementaire.
- Il est recommandé d'établir une procédure de démarrage et de redémarrage de l'installation, notamment après les opérations de maintenance, incluant une vérification de la position des vannes manuelles.
- Il est préférable de ne pas disposer de bouteilles de gaz proches d'une source d'énergie, et il est recommandé d'installer les bouteilles de gaz à l'extérieur, si possible.
- Les dispositifs techniques et les procédures de maîtrise des risques d'une installation doivent tenir compte de l'environnement naturel dans lequel elle est implantée. La qualité de l'air (humidité, salinité) et les gammes de températures extérieures doivent être considérées pour éviter de perturber le bon fonctionnement des capteurs. L'activité sismique est également un risque naturel à considérer au cas par cas.

## 4.6 - Moyens humains pour la maîtrise des risques

Les moyens humains interviennent systématiquement en complément de moyens techniques dans la maîtrise d'une installation industrielle. Il est primordial que les équipes opératrices ou de maintenance soient formées et appliquent les procédures de sécurité liées à aux événements dangereux : mise en arrêt de l'installation, actions à mener en cas d'alerte, protection d'équipements exposés à la propagation d'un phénomène dangereux, etc.

Ce point est particulièrement important dans le cadre d'installations produisant et manipulant de l'hydrogène, compte tenu des spécificités de ce gaz, notamment en raison de la non-détectabilité à l'œil nu d'une flamme d'hydrogène et de sa propagation rapide en milieu extérieur. L'analyse des retours d'expérience disponibles sur l'accidentologie des installations industrielles concernées par ce guide indique qu'une part non négligeable des accidents recensés est due à une négligence des opérateurs quant aux risques liés à l'utilisation d'hydrogène, notamment lors de l'ouverture non sécurisée de vannes de purge libérant de l'hydrogène. Cette analyse traite également d'aspects techniques relatifs à la maîtrise des risques. Elle est fournie en annexe.

# 5 - Récapitulatif des moyens de maîtrise des risques

Le tableau II propose un récapitulatif des moyens de maîtrise des risques décrits dans le guide, organisé par types d'équipements. Les moyens de maîtrise des risques transverses aux équipements sont donnés en début de tableau.

Ce tableau constitue un outil d'aide à la réflexion lors de la conception ou de la réception d'une installation de production décentralisée d'hydrogène, mais il n'est pas exhaustif et ne se substitue pas à une analyse de risque spécifique à l'installation.

**TABLEAU II - MOYENS DE MAÎTRISE DES RISQUES PAR ÉQUIPEMENTS**

Moyens de maîtrise des risques par équipement	
Transverse aux équipements	
Choix de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix des matériaux adaptés pour résister à la fragilisation par l'hydrogène (ISO TR 15916) et par l'éventuel électrolyte alcalin corrosif</li> <li>• Choix de raccords soudés plutôt que vissés</li> <li>• Application des normes et directives liées aux équipements exposés aux pressions excessives</li> </ul>
Boucles de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Détection d'anomalies sur le contrôle commande</li> </ul>
Installation, exploitation et maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procédures de montage/démontage des raccords</li> <li>• Vérification périodique de la force de vissage des raccords vissés exposés aux vibrations mécaniques</li> <li>• Procédures de sécurité sur la circulation des véhicules</li> <li>• Procédures de sécurité lors d'opérations de maintenance et travaux</li> <li>• Maintenance préventive, vérifications périodiques et programme d'inspections pour contrôler l'état d'usure des équipements exposés à la corrosion et à la fatigue mécanique</li> <li>• Détecteur d'hydrogène dans l'air en milieu confiné</li> <li>• Ventilation naturelle et forcée en milieu confiné</li> <li>• Définition des procédures de démarrage, de dépressurisation, d'inertage et d'isolement d'équipements adaptées aux équipements et aux événements redoutés</li> <li>• Procédures de contrôle de la fiabilité de la boucle de pilotage</li> </ul>
Système d'alimentation en eau	
Choix de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conception afin de prévenir le gel en cas de températures basses</li> </ul>
Boucles de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure du niveau d'eau dans le réservoir d'alimentation</li> </ul>

## Moyens de maîtrise des risques par équipement

### Système d'alimentation en eau

Installation, exploitation et maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle continu ou périodique de la qualité de l'eau</li> </ul>
<b>Electrolyseur</b>	
Choix de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isoler et cloisonner autant que possible les compartiments H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> </ul>
Boucles de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure de la température des empilements, contrôle du niveau d'alimentation en eau dans l'électrolyseur (mesure du débit d'eau) avec un seuil et une alarme déclenchant l'arrêt de l'électrolyseur en cas de risque de surchauffe</li> <li>• Mesure de la concentration d'H<sub>2</sub> dans le compartiment O<sub>2</sub></li> <li>• Mesure de la puissance électrique consommée aux bornes des empilements</li> <li>• Mesure de la pression différentielle entre les compartiments H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> <li>• Mesure de la température au recombiner catalytique d'H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub></li> </ul>
Installation, exploitation et maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplacement périodique des membranes et diaphragmes selon le calendrier prévisionnel d'usure du fournisseur</li> <li>• Mesure périodique de la résistance des cellules d'électrolyse pour détecter une surchauffe</li> <li>• Contrôle régulier (principalement avant tout démarrage) et nettoyage de la sortie des événements</li> </ul>
<b>Canalisations</b>	
Choix de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix de matériaux compatibles avec l'hydrogène</li> </ul>
Boucles de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure de pression</li> </ul>
Installation, exploitation et maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procédure de contrôle de la corrosion</li> </ul>
<b>Compresseur</b>	
Boucles de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure de la pression à l'aspiration du compresseur asservie au démarrage du compresseur à un niveau de pression minimum pour garantir l'étanchéité du système</li> </ul>
<b>Stockage en bouteilles</b>	
Choix de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtements polymères anti-perméation en option pour les milieux confinés</li> </ul>
<b>Stockage sur hydrures</b>	
Choix de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soupape de sécurité reliée à un événement. Le dispositif doit être étanche aux infiltrations d'air en cas de dépression dans le réservoir. Si la soupape n'est pas étanche, un disque de rupture peut être positionné en aval</li> <li>• Conception d'un réservoir adapté à l'évolution de volume des hydrures</li> </ul>
Boucles de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure de la pression et de la température dans le réservoir d'hydrures</li> <li>• Analyse des impuretés (principalement l'eau) dans l'hydrogène à l'entrée du réservoir d'hydrures</li> </ul>

# Conclusion

---

Ce guide est issu d'une démarche méthodologique visant à identifier de façon générique les types de risques à maîtriser sur les premières installations de production décentralisée d'hydrogène susceptibles de voir le jour en France, ainsi que les moyens disponibles pour les maîtriser. Les types d'équipements considérés sont les électrolyseurs alcalins et PEM, les tuyauteries de transfert d'hydrogène, les compresseurs d'hydrogène et les unités de stockage d'hydrogène en bouteilles ou sur hydrures.

Les échanges avec les acteurs de la filière (industriels, équipementiers, exploitants) et l'analyse préliminaire des risques menée par l'Ineris sur des exemples génériques d'installation type indiquent que la conception et l'opération de ces installations nécessitent d'être particulièrement attentif aux risques de :

- fuites d'hydrogène dans l'atmosphère ;
- formation de mélange hydrogène-oxygène et hydrogène-air dans les équipements ;
- exposition des hydrures à l'air ou à l'eau.

Les fuites d'hydrogène peuvent se produire sur l'ensemble de l'installation et déclencher un incendie, voire une explosion sur le site. La prévention des fuites d'hydrogène passe en premier lieu par le choix de matériaux adaptés en phase de conception et par le contrôle de l'étanchéité des raccords de l'installation en phase de montage et à la suite des opérations de maintenance. Les moyens de détection et de contrôle d'une fuite d'hydrogène diffèrent selon le débit de fuite et le milieu dans lequel elle se produit (milieu intérieur confiné ou extérieur à l'air libre). Dans le cas de fuites de petit débit, une ventilation naturelle permet de maîtriser facilement le risque de formation d'un mélange explosif dans l'air ambiant. Dans le cas d'une fuite de débit modéré, une ventilation forcée permet de maîtriser ce risque. Dans ce cas, ou lors d'une fuite de grand débit, la partie de l'installation en cause doit être isolée et dépressurisée. De façon générale, les moyens de maîtrise des risques de fuite doivent être sélectionnés selon les types de fuites potentielles.

La formation d'un mélange explosif d'hydrogène et d'oxygène dans les équipements concerne principalement les électrolyseurs et les compresseurs. La prévention de ce phénomène repose avant tout sur la conception du système de conduite du procédé, afin d'assurer l'étanchéité des compartiments hydrogène et oxygène dans l'électrolyseur et d'éviter l'infiltration d'air dans les compresseurs.

Au sein de l'électrolyseur, la fiabilité des boucles de détection d'anomalies (mesures de pression, température et concentrations de gaz) est cruciale pour pouvoir dépressuriser et inerte les parties à risques, dès la formation d'un mélange potentiellement explosif.

Les hydrures utilisés pour le stockage d'hydrogène dans un matériau à l'état solide peuvent être fortement réactifs à l'air ou à l'eau. Les réservoirs d'hydrures doivent être étanches pour éviter l'infiltration d'air. La fiabilité des boucles de détections d'eau dans l'hydrogène injecté dans le réservoir et de détection de températures excessives est également cruciale pour pouvoir contrôler au plus vite les réactions susceptibles de générer un incendie, voire une explosion dans le réservoir.

À l'instar de toute installation industrielle manipulant des produits dangereux, les facteurs organisationnels et humains joueront un rôle prédominant dans la sécurité de ces installations. La formation du personnel et la mise en place de procédures de sécurité (démarrage, arrêt, maintenance, gestion d'incidents) sont deux éléments indispensables à la sécurité de ceux-ci.

Les installations de production décentralisée d'hydrogène mettent en œuvre des équipements, manipulent des produits et visent des marchés pour lesquels de nombreux documents de référence existent déjà en matière de sécurité (directives, normes, guides de conception). Les pratiques actuelles de la filière reposent sur un état de l'art normatif et sur un panel de moyens de maîtrise des risques dense.

Ce guide représente un premier document de capitalisation des connaissances et du savoir-faire de la filière française de production décentralisée d'hydrogène en matière de sécurité. Il a néanmoins ses limites, notamment en raison de son analyse générique et qualitative d'installations potentielles, mais non existantes. Toutefois il amorce un chantier de capitalisation, de partage et d'uniformisation des savoirs et des pratiques de sécurité. Cet effort doit être poursuivi par des analyses quantitatives et spécifiques aux tailles et contextes d'implantation des installations, afin de définir un cadre réglementaire garantissant la sécurité des personnes, tout en facilitant le déploiement des installations et le développement de la filière.

# Bibliographie

---

- [1] "Fuel Cell Today", Fuel Cell Patent Review, 2012. [Online]. <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/patents/2012/2012-fuel-cell-patent-review>
- [2] Ineris. [Online]. Source : [http://www.ineris.fr/centredoc/rapport\\_omega\\_7-2.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/rapport_omega_7-2.pdf)
- [3] ISO/TR 15916 : 2004.
- [4] André Laurent, Sécurité des procédés chimiques – Connaissances de base et méthodes d'analyse des risques, p161, 2e édition, 2011.
- [5] M. Zhu, H. Wang, L. Z. Ouyang, and M. Q. Zeng, "Composite structure and hydrogen storage properties in Mg-based alloys", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 31 (2), pp. 251-257, 2006.
- [6] U.S. Department of Energy. Hydrogen Lessons Learned. [Online]. <http://h2tools.org/lessons/>
- [7] Joint Research Centre Institute for Energy and Transport. Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD). [Online]. <https://odin.jrc.ec.europa.eu/engineering-databases.jsp>
- [8] Direction générale de la prévention des risques du ministère du Développement durable. ARIA (Analyse, recherche et information sur les accidents). [Online]. <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/rechercher-un-accident/>
- [9] Grigoriev et al., "High-Pressure PEM Water Electrolysis and Corresponding Safety Issues", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, pp. 2721-2728, 2010.
- [10] R. G. Zalosh and T. P. Short, "Compilation and Analysis of Hydrogen Accident Reports", Factory Mutual Research Corp., 1978.
- [11] Nouman Rafique Mirza, Sven Degenkolbe, and Werner Witt, "Analysis of Hydrogen Incidents to Support Risk Assessment; International Journal of Hydrogen Energy", vol. 36 – Issue 18, pp. 12068-12077, September 2011.
- [12] « Veille technologie et évaluation des risques sur les procédés de stockages hydrogène », Ineris, DRA-13-125497-00405A.
- [13] Inchem. [Online]. [www.inchem.org](http://www.inchem.org)
- [14] Fiche de données de sécurité Argon G004. [Online]. [www.di-services.fr/gaz/G004\\_argon.pdf](http://www.di-services.fr/gaz/G004_argon.pdf)
- [15] FT 35 INRS, fiche toxicologique - Hydroxyde de potassium et solution aqueuse.
- [16] FT 20 INRS, fiche toxicologique - Hydroxyde de sodium et solution aqueuse.

# 6 - Annexe I : normes et documents de référence

La conception des installations de production décentralisée d'hydrogène et les moyens associés pour la maîtrise des risques font l'objet de nombreux documents de référence, en France ou à l'étranger :

- Les réglementations générales, telles que des directives européennes (concernant les atmosphères explosives, les équipements sous pression, etc.) et des réglementations nationales (installations classées pour la protection de l'environnement).
- Les normes internationales, européennes et nationales, spécifiques à l'hydrogène, à chaque installation et aux différents équipements qui la composent.
- Les documents de référence publiés notamment par l'Association européenne des gaz industriels.

Le panorama des documents de référence est donc très étendu. Sans toutefois viser à l'exhaustivité, ce guide récapitule les principales normes, directives européennes et documents internationaux de recommandations qui peuvent être associés à ce type d'installation.

## 6.1 - Normes

Pour l'hydrogène utilisé en tant que vecteur énergétique, la normalisation au niveau mondial s'établit via l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et la Commission électrotechnique internationale (IEC). Au niveau européen, c'est le CEN-Cenelec qui s'en assure ; au niveau national, l'Afnor (Association française de normalisation) et l'Union technique de l'électricité (UTE).

Au niveau international, le comité ISO/TC197 « Technologies de l'hydrogène » travaille à la normalisation des systèmes et des dispositifs pour la production, le stockage, le transport, le mesurage et l'utilisation de l'hydrogène. Les standards internationaux concernant les technologies de piles à combustible sont, quant à eux, traités par la Commission électrotechnique internationale IEC/TC 105 « Technologies des piles à combustible ». Les référentiels de l'Organisation internationale de normalisation sont des spécifications techniques (TS), des rapports techniques (TR), des fascicules de documentation (FD), ou bien des normes internationales (ISO ou IEC). Certaines normes internationales ont été déclinées en version européenne (EN) ou française (NF). Dans ce cas, seules ces versions sont mentionnées dans ce guide.

### ■ 6.1.1 - Textes généraux

L'Organisation internationale de normalisation a émis un rapport technique, ISO/TR-15916:2014 (voir tableau 12) concernant l'utilisation de l'hydrogène en phase gazeuse et liquide. Il identifie les questions fondamentales liées à la mise en œuvre de l'hydrogène, à la sécurité et aux risques.

**TABLEAU 12 - TEXTES GÉNÉRAUX RELATIFS À LA SÉCURITÉ DES SYSTÈMES METTANT EN ŒUVRE L'HYDROGÈNE**

Numéro	Titre
FD ISO/TR 15916:2014	Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène
NF M58-003:2013	Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène

La norme NF M58-003 a pour objet de fixer les exigences quant à l'installation des équipements de production d'hydrogène, des équipements fonctionnant à l'hydrogène, des équipements de distribution d'hydrogène, des récipients de stockage d'hydrogène, de la tuyauterie d'hydrogène, ainsi que de leurs accessoires. Elle vise toutes les applications mettant en œuvre de l'hydrogène gazeux, y compris en environnement non industriel et dans les établissements recevant du public, à l'exception des applications suivantes :

- L'utilisation d'hydrogène dans les raffineries de pétrole et les usines chimiques comme charge d'alimentation et dans le processus de production.
- Les installations industrielles qui produisent ou utilisent en continu des débits massiques excédant 400 Nm<sup>3</sup>/h.

### ■ 6.1.2 - Systèmes de production d'hydrogène

Concernant la production sur site, des normes ISO ont été éditées pour chaque procédé (voir tableau 13). Ces normes précisent les exigences en termes de construction et de sécurité de chaque procédé. Pour les procédés d'électrolyse de l'eau et de reformage, chaque domaine d'application (industrielle ou résidentielle) a ses spécificités.

**TABLEAU 13 - NORMES RELATIVES AUX SYSTÈMES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE**

Numéro	Titre
NF ISO 16110-1:2009	Générateurs d'hydrogène utilisant les technologies de traitement du carburant - Partie 1 : sécurité
ISO 22734-1:2008	Générateurs d'hydrogène utilisant le procédé d'électrolyse de l'eau - Partie 1 : applications industrielles et commerciales
ISO 22734-2 :2011	Générateurs d'hydrogène utilisant les procédés d'électrolyse à l'eau - Partie 2 : applications résidentielles

La partie 1 de l'ISO 16110-1:2009 s'applique aux systèmes de génération d'hydrogène conditionnés, autonomes ou adaptables en sortie usine, d'une capacité inférieure à 400 Nm<sup>3</sup>/h, permettant de convertir un carburant d'entrée en gaz riche en hydrogène, de composition et de conditions adaptées aux dispositifs fonctionnant à l'hydrogène (systèmes d'alimentation à pile à combustible ou systèmes de compression, de stockage et de distribution d'hydrogène, par exemple).

L'ISO 22734-1:2008 définit les exigences de fabrication, de sécurité et de rendement relatives aux appareils de génération d'hydrogène gazeux emballés ou assemblés en usine, utilisant l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux. Elle s'applique aux générateurs d'hydrogène qui utilisent les types suivants de milieu de transport des ions : bases aqueuses ; polymères solides avec un groupe à fonction acide, comme les PEM.

L'ISO 22734-1:2008 s'applique aux générateurs d'hydrogène prévus pour une utilisation commerciale ou industrielle intérieure ou extérieure (utilisation non résidentielle). Les générateurs d'hydrogène qui peuvent aussi être utilisés pour produire de l'électricité, comme les piles à combustible réversibles, sont exclus du domaine d'application de l'ISO 22734-1:2008.

### ■ 6.1.3 - Textes relatif à la gestion des surpressions

Comme toute installation mettant en œuvre des équipements sous pression, les unités de production décentralisée d'hydrogène suivent les exigences normatives pour la gestion des surpressions (voir tableau 14).

**TABLEAU 14 - NORMES RELATIVES À LA GESTION DES SURPRESSIONS**

Numéro	Titre
NF EN ISO 4126-1:2013	Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives - Partie 1 : soupapes de sûreté
NF EN ISO 4126-2:2003	Dispositifs de sécurité pour la protection contre les pressions excessives - Partie 2 : dispositifs de sûreté à disque de rupture

L'ISO 4126-1:2013 spécifie les exigences générales des soupapes de sûreté, quel que soit le fluide pour lequel elles sont conçues. Elle est applicable aux soupapes de sûreté présentant un orifice d'écoulement de diamètre supérieur ou égal à 4 mm, qui sont utilisables à des pressions de début d'ouverture de 0,1 bar effectif et plus. Aucune limitation en température n'est fixée. L'ISO 4126-1:2013 est une norme de produit et elle n'est pas applicable à la mise en œuvre des soupapes de sûreté.

L'ISO 4126-2:2003 spécifie les prescriptions applicables aux dispositifs de sûreté à disque de rupture. L'ISO 4126-2:2003 comprend les prescriptions de conception, de fabrication, de contrôle, d'essai, de marquage, de certification et de conditionnement. Les prescriptions concernant l'application, la sélection et l'installation des dispositifs de sûreté à disque de rupture sont indiquées dans l'ISO 4126-6.

### ■ 6.1.4 - Textes spécifiques à certains éléments des installations

Certains textes sont spécifiques à des équipements de l'installation, tels que les bouteilles, les hydrures ou les piles à combustible (voir tableau 15).

**TABLEAU 15 - DOCUMENTS SPÉCIFIQUES AU STOCKAGE ET AUX PILES À COMBUSTIBLE**

Numéro	Titre
IEC 62282-3-100 Ed. 1.0	Technologies des piles à combustible - Partie 3-100 : Technologies des piles à combustible stationnaires - Sécurité
ISO 11114:2012	Bouteilles à gaz - Compatibilité des matériaux des bouteilles et des robinets avec les contenus gazeux - Partie 1 : matériaux métalliques
ISO/DIS 16111:2007	Appareils de stockage de gaz transportables - Hydrogène absorbé dans un hydrure métallique réversible

L'IEC 62282-3-100 Ed. 1.0 traite des piles à combustible stationnaires.

L'ISO 11114-1:2012 prend en considération les bouteilles à gaz composites, métalliques soudées, métalliques sans soudure et leurs robinets, utilisées pour contenir des gaz comprimés, liquéfiés et dissous.

L'IOS/DIS 16111:2007 traite spécifiquement du stockage sur hydrures.

## 6.2 - Textes spécifiques en Europe

En Europe, les concepteurs et exploitants d'installations de production décentralisée d'hydrogène doivent s'assurer de l'application des directives européennes (voir tableau 16).

**TABLEAU 16 - DIRECTIVES EUROPÉENNES APPLICABLES AUX INSTALLATIONS DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE D'HYDROGÈNE**

Directive	Nom de la directive
2014/34/UE	Directive 2014/34/UE du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles
97/23/CE	Directive 97/23/CE du 29 mai 1997 relative au rapprochement des législations des États membres concernant les équipements sous pression
1999/36/CE	Directive 1999/36/CE du 29 avril 1999 relative aux équipements sous pression transportables
1999/92/CE	Directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999 concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives
2004/108/CE	Directive 2004/108/CE du 15 décembre 2004 relative au rapprochement des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique et abrogeant la directive 89/336/CEE
2006/95/CE	Directive 2006/95/CE du 12 décembre 2006 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension
2006/42/CE	Directive 2006/42/CE du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE

La conformité CE est obligatoire en Europe. Les installations de production décentralisées font appel à plusieurs directives, notamment les directives

machine - 2006/42/CE, basse tension - 2006/95/CE, les équipements sous pression - 97/23/CEE, équipements Atex - 2014/34/UE citées dans le tableau 16. Selon la directive concernée, l'examen de mise en conformité relève de l'autocertification ou doit être délivré par un organisme notifié à l'issue du contrôle.

## 6.3 - Textes internationaux

Les textes internationaux listés dans le tableau 17 fournissent également des recommandations sur la conception des équipements et installations de production décentralisée d'hydrogène, sur lesquels la filière française s'appuie actuellement. Ces documents ont généralement pour objectif d'établir les premiers éléments de standardisation des pratiques, en amont de la rédaction de normes.

**TABLEAU 17 - DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE INTERNATIONAUX**

Nom	Titre
IGC Doc 121/04/E	Hydrogen Transportation Pipelines
IGC Doc 100/03/E	Hydrogen Cylinders and Transport Vessels
IGC 13-12-E	Oxygen Pipeline & Piping
IGC 15-06-E	Gaseous Hydrogen Stations
IGC 60-04-E	Prevention of Major Accidents
AIGA 087/14	Standard for Hydrogen Piping Systems at User Location
HSE - RR715	Installation permitting Guidance for H <sub>2</sub> and Fuel Cell Stationary Applications, UK version

Les documents IGC sont publiés par le Comité des gaz industriels appartenant à l'Association européenne des gaz industriels (EIGA) et ont pour vocation de fournir des recommandations pour la standardisation des mesures de sécurité liées à la production, au stockage, au transport et à l'utilisation de gaz industriels. De la même façon, l'Association asiatique des gaz industriels (AIGA) a publié un document décrivant les spécifications et principes généraux relatifs aux tuyauteries transportant de l'hydrogène.

Le rapport HSE-RR715 du bureau britannique pour la santé et la sécurité (Health and Safety Executive) a été publié à l'issue du projet de recherche européen Hyper (HYdrogen PERmitting) pour le développement d'un guide facilitant la délivrance d'autorisations pour les installations d'hydrogène en Europe.

# 7 - Annexe 2 : analyse des retours d'expérience

Une analyse des retours d'expérience d'accidentologie a été menée sur les procédés mis en œuvre par les trois exemples d'installation type présentés dans ce guide : la production d'hydrogène par électrolyse alcaline ou par PEM, la compression d'hydrogène en sortie d'électrolyseur, le transfert d'hydrogène comprimé par canalisation et, enfin, le stockage d'hydrogène en bouteilles ou sous forme d'hydrures. Il n'existe pas à l'échelle internationale ou nationale de bases de données exhaustives sur l'accidentologie relative à l'hydrogène énergie. Afin de réaliser les analyses de risque sur ces exemples d'installation type, l'Ineris a utilisé les données accessibles dans les bases des données suivantes :

- Hydrogen Lessons Learned : base de données du secrétariat américain à l'Énergie (7 : voir page 39).
- The Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD) : base de données du Joint Research Centre Institute for Energy and Transport [7].
- ARIA (analyse, recherche et information sur les accidents) : base de données de la Direction générale de la prévention des risques du ministère du Développement durable [8].
- Le projet BASHYC : base de connaissance sur l'accidentologie hydrogène, étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Alpeha Hydrogène.

Une analyse des retours d'expérience sur l'accidentologie des installations industrielles manipulant ces technologies a été effectuée.

L'industrie de l'hydrogène étant principalement liée à la production de gaz de synthèse pour produire de l'ammoniac et du chlore, les retours d'expérience disponibles et applicables à l'hydrogène pur (donc l'hydrogène en tant que vecteur énergétique) sont peu nombreux. Au total, 27 accidents ont été identifiés comme applicables aux installations type considérées. Malgré ce chiffre faible, il est possible de tirer des premières conclusions et des enseignements pour chacune des étapes mises en œuvre.

## 7.1 - Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

### ■ 7.1.1 - Électrolyse alcaline

Un seul retour d'expérience industriel a été identifié sur un électrolyseur alcalin. La cause de l'accident est liée à un défaut d'alimentation de l'électrolyseur en eau dû à une obstruction des canalisations d'eau. Le faible niveau d'électrolyte a conduit à un fort taux d'oxygène dans le réservoir d'hydrogène. Ce risque est largement anticipé lors de la conception d'un électrolyseur, mais la barrière de sécurité mise en place (détecteur d'oxygène dans le réservoir d'hydrogène) n'a pas fonctionné à cause d'une défaillance du système électrique. L'accident est donc dû à une combinaison d'événements provoquant un scénario dangereux identifié au préalable.

### ■ 7.1.2 - Électrolyse PEM

Aucun accident lié à l'hydrogène sur un électrolyseur PEM n'a été enregistré à l'échelle industrielle. En revanche, 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 [9]. Au-delà des risques dus à l'opération d'un système à haute pression jusqu'à 130 bar, non applicables aux exemples d'installations considérés dans ce guide, un risque générique à l'électrolyse PEM a été identifié. Il s'agit de la perméation croisée d'oxygène et d'hydrogène à travers la membrane PEM, pouvant conduire à la présence d'oxygène dans le compartiment hydrogène de l'électrolyseur ou, à l'inverse, à la présence d'hydrogène dans le compartiment oxygène de l'électrolyseur.

L'étude envisage deux types de solutions pour maîtriser ce risque :

- Le développement de membranes de plus grande épaisseur ou à base d'autres matériaux, tels que des composites dont la résistance à la perméation inverse sera augmentée.
- L'utilisation de recombineurs catalytiques pour contrôler la concentration d'oxygène et d'hydrogène dans chacun des deux compartiments de l'électrolyseur.

## 7.2 - Compression d'hydrogène

Six accidents ont été identifiés sur la compression d'hydrogène. Parmi ces accidents, deux sont dus à une infiltration d'air dans le compresseur, trois à une fuite d'hydrogène vers l'air ambiant, et un n'a pas de cause identifiée.

L'infiltration d'air dans le compresseur a lieu à l'aspiration. Dans l'un des deux cas, la raison est non identifiée, dans l'autre cas, une succession d'événements en cascade est en cause avec, à l'origine, la fonte d'un fusible due à des travaux sur le réseau électrique. L'infiltration d'air a mené à une explosion dans les deux cas.

Ces retours d'expérience confirment le risque connu d'infiltration d'air à l'aspiration. En revanche, le diagnostic des causes à l'origine de l'infiltration d'air n'est pas relaté pour ces accidents, probablement en raison de la difficulté à réaliser un tel diagnostic après une explosion. Ainsi, ces retours d'expérience ne permettent pas d'enrichir les recommandations de prévention de ce risque.

Les fuites d'hydrogène vers le milieu ambiant sont dues à une défaillance matérielle (bride ou clapet antiretour) dans deux cas. La cause du troisième cas de fuite est non identifiée.

## 7.3 - Transfert d'hydrogène en canalisation

Onze accidents ont été identifiés sur le transfert d'hydrogène en canalisation. Ils sont tous liés à la libération d'hydrogène dans l'environnement.

Parmi ces accidents, un seul est dû à la corrosion. Cet accident a eu des conséquences majeures, car la canalisation était enterrée, et l'hydrogène libéré s'est accumulé jusqu'à produire une explosion. Il paraît donc préférable de ne pas enterrer une canalisation d'hydrogène, afin d'identifier une possible fuite et d'éviter une accumulation d'hydrogène en milieu confiné.

Les autres accidents identifiés ont pour origine une défaillance matérielle ou humaine. Les défaillances matérielles en cause peuvent être localisées sur le métal de la canalisation (fissure, voire rupture de la canalisation) ou sur un élément d'assemblage de la canalisation (rupture d'un joint ou d'une bride). Les défaillances humaines sont dues à des erreurs d'opération ou de maintenance avec une mauvaise application des procédures de sécurité.

## 7.4 - Stockage d'hydrogène

### ■ 7.4.1 - Stockage en bouteilles

Huit accidents ont été identifiés sur le stockage d'hydrogène en bouteilles : six sont dus à une fuite d'hydrogène dans l'air ambiant ; un accident est dû à un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans le système ; le dernier est dû à une surpression dans le système.

Ces accidents ont pour origine des causes variées et non spécifiques au stockage. Il s'agit de la corrosion des métaux, la rupture mécanique de parois par fatigue, une défaillance humaine ou matérielle, ou encore la foudre. La plupart auraient pu être prévenus par l'application de procédures plus strictes en matière de révision des équipements et de consignes de sécurité aux opérateurs.

### ■ 7.4.2 - Stockage sous forme d'hydrures

Aucun accident n'a été identifié sur une installation manipulant un stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures. Cependant, on recense un accident avec explosion et feu, lors de la production des galettes d'hydrures. Le danger est lié à la pyrophoricité des hydrures pulvérulents quand ils entrent en contact avec l'air.

## 7.5 - Enseignements transverses

Selon les données disponibles, peu d'accidents recensés sont dus à des défauts intrinsèques des procédés de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. La corrosion, la fatigue mécanique et la défaillance de pièces isolées sont régulièrement en cause. Ces phénomènes peuvent être anticipés et maîtrisés par des standards de conception et par des procédures plus strictes de révision des équipements.

Une part non négligeable des accidents recensés est due à une négligence des opérateurs quant aux risques liés à l'utilisation d'hydrogène, notamment lors de l'ouverture non sécurisée de vannes de purge libérant de l'hydrogène.

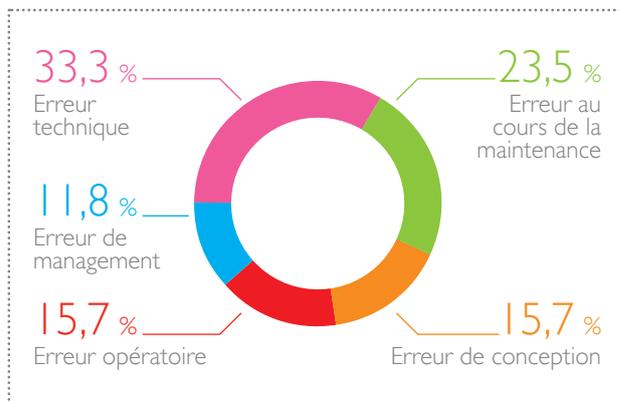
En marge de l'accidentologie réalisée sur les bases de données accessibles et citée en début de section 7, une étude de Zalosh et al. [10], réalisée en 1978 sur un panel de 409 accidents liés à l'hydrogène, indique que plus de 50 % des fuites enregistrées ont conduit à des explosions tandis que moins de 30 % ont conduit à des incendies.

La fréquence d'explosions ou d'incendies varie selon que les fuites se produisent à l'intérieur de locaux ou à l'air libre :

- En cas de fuite à l'intérieur, on relève trois fois plus d'explosions que d'incendies.
- En revanche, à l'air libre, les fuites ont occasionné à peu près autant d'explosions que d'incendies.
- L'inflammation est plus probable lorsque la fuite se produit à l'intérieur : sur 167 cas reportés en milieu extérieur, 32 sont sans inflammation. À l'intérieur, seuls 4 cas de non-inflammation sont rapportés pour un nombre équivalent de fuites.

Une étude plus récente, datant de 2011, sur les causes de 32 incidents concernant les procédés de l'hydrogène montre que la plupart (33 %) sont dus à une mauvaise réalisation technique (hors stations-services, utilisation domestique et transport d'hydrogène, exclus de cette étude) (voir figure 15) [11].

FIGURE 15 : ORIGINES DES INCIDENTS IDENTIFIÉES [11]



Cette étude conclut que le « facteur organisationnel et humain » joue un rôle prédominant dans la survenue de ces incidents.

# 8 - Annexe 3 : tableaux de propriétés des substances manipulées

## 8.1 - Hydrogène

**TABLEAU 18** - PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'HYDROGÈNE [12]

Propriété physicochimique	Valeur
Formule chimique	H <sub>2</sub>
N° CAS	1333-74-0
État physique	Incolore et inodore, gaz comprimé ou liquéfié
Feu	Extrêmement inflammable
Explosion	Mélange air-gaz explosif
Masse moléculaire	2,016 g/mol
Composition stœchiométrique dans l'air, en fraction volumique	29,53
Densité (air=1)	0,07
Masse volumique du gaz	0,08342 kg/Nm <sup>3</sup> (20 °C/ 1 atm)
Solubilité dans l'eau	0,019 (vol/vol à 15,6 °C)
Energie minimale d'inflammation	17 µJ dans l'air 1,2 µJ dans l'oxygène
Plage d'inflammabilité dans l'air	4,0 % à 75 % (dans l'air à TPN <sup>3</sup> ) 4,0 % à 94 % (dans l'oxygène à TPN)
Température d'auto-inflammation	585 °C/ 858 °K
Vitesse fondamentale de combustion dans l'air à TPN	2,65 à 3,25 m/s
Température de flamme dans l'air	2045 °C
Énergie théorique d'explosion	2,02 kg TNT/m <sup>3</sup> gaz
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm <sup>2</sup> /s

## 8.2 - Oxygène

**TABLEAU 19** - PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'OXYGÈNE [13]

Propriété physicochimique	Valeur
Formule chimique	O <sub>2</sub>
N° de CAS	7782-44-7
État physique	Incolore et inodore, gaz comprimé ou liquéfié (liquide bleuté)
Feu	Comburant : l'oxygène peut engendrer une combustion avec d'autres substances
Masse moléculaire	32,0 g/mol
Densité (air = 1)	1,1
Solubilité dans l'eau	3,1 mL/100mL
Point d'ébullition	- 183 °C

## 8.3 - Azote

**TABLEAU 20** - PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'AZOTE [13]

Propriété physicochimique	Valeur
Nom	Azote
Formule chimique	N <sub>2</sub>
N° de CAS	231-783-9
État physique	Incolore et inodore gaz comprimé ou liquéfié
Feu	Gaz inerte
Masse moléculaire	28 g/mol
Densité (air = 1)	0,97

## 8.4 - Argon

**TABLEAU 21** - PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'ARGON [13] [14]

Propriété physicochimique	Valeur
Nom	Argon
Formule chimique	Ar
N° de CAS	7440-37-1
État physique	Incolore et inodore, gaz comprimé ou liquéfié
Feu	Gaz inerte. L'exposition prolongée au feu peut entraîner la rupture et l'explosion des récipients
Masse moléculaire	40 g/mol
Densité (air = 1)	1,66

## 8.5 - Hydroxyde de potassium

**TABLEAU 22** - PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'HYDROXYDE DE POTASSIUM [15]

Propriété physicochimique	Valeur
Nom	Hydroxyde de potassium
Formule chimique	KOH
N° de CAS	1310-58-3
État physique	Solide blanc inodore, très hygroscopique <sup>5</sup> , déliquescent
Masse moléculaire	56,11 g/mol
Masse volumique	2,044 g/cm <sup>3</sup>
Pression de vapeur	1,3 hPa à 25 °C
pH d'une solution aqueuse 0,1M	13,5 à 14
Point d'ébullition	1320-1327 °C

## 8.6 - Hydroxyde de sodium

**TABLEAU 23** - PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'HYDROXYDE DE SODIUM [16]

Propriété physicochimique	Valeur
Nom	Hydroxyde de sodium
Formule chimique	NaOH
N° de CAS	1310-73-2
État physique	Solide blanc inodore, très hygroscopique <sup>5</sup> , déliquescent
Masse moléculaire	39,997 g/mol
Masse volumique	2,13 g/cm <sup>3</sup>
Pression de vapeur	<10-5 hPa à 25 °C (calculée)
Point d'ébullition	216 °C (solution avec H <sub>2</sub> O à 80 %) 128 °C (solution avec H <sub>2</sub> O à 40 %) 128 °C (solution avec H <sub>2</sub> O à 20 %)

(5) Qui absorbe rapidement l'humidité de l'air ainsi que le dioxyde de carbone avec lequel il forme du carbonate de potassium.

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

“

*La production décentralisée d'hydrogène comme vecteur énergétique renouvelable peut concerner de vastes marchés et applications potentiels : la mobilité, la production d'électricité et de chaleur stationnaire, le stockage d'électricité sous forme de gaz.*

*Ce guide s'adresse à tous les acteurs intéressés par le développement ou l'installation d'une unité de production décentralisée d'hydrogène, mais non familiers des problématiques de sécurité pour ce type d'installations innovantes.*

”

