

RAPPORT D'ETUDE
N°DRA-15-149420-06399C

15/03/2016

**ETUDE COMPARATIVE DES
REGLEMENTATIONS, GUIDES ET NORMES
CONCERNANT LES ELECTROLYSEURS ET LE
STOCKAGE D'HYDROGENE**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

Etude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène

Direction des Risques Accidentels

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Valérie DE DIANOUS, Sylvaine PIQUE, Benno WEINBERGER.

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Étant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.



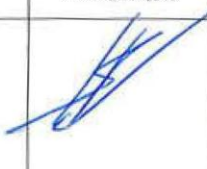


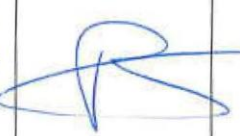
| | Rédaction | Relecture | | Vérification | | Approbation |
|---------|--|---|--|--|---|---|
| NOM | S. PIQUE | S. KRIBI | B. WEINBERGER | B. DEBRAY | F. MERLIER | F. ROUSSEAU |
| Qualité | Ingénieur Unité Evaluation et Maîtrise des Risques d'Inflammation et d'Explosion dans les Procédés Direction des Risques Accidentels | Responsable Programme DRA-71 Direction des Risques Accidentels | Ingénieur Unité Evaluation et Maîtrise des Risques d'Inflammation et d'Explosion dans les Procédés Direction des Risques Accidentels | Responsable Unité Evaluation et Maîtrise des Risques d'Inflammation et d'Explosion dans les Procédés Direction des Risques Accidentels | Délégué Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels | Responsable Pôle Substances et Procédés Direction des Risques Accidentels |
| Visa |  |  |  |  |  |  |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION..... | 7 |
| 1.1 Contexte de l'étude..... | 7 |
| 1.2 Champ des installations concernées..... | 9 |
| 1.3 Organisation du rapport..... | 10 |
| 2. INSTALLATIONS D'ELECTROLYSE ET STOCKAGES D'HYDROGENE ASSOCIES..... | 13 |
| 2.1 Production d'hydrogène..... | 13 |
| 2.1.1 Procèdes de production d'hydrogène | 13 |
| 2.1.2 Principe de l'électrolyse de l'eau..... | 14 |
| 2.1.3 Technologies d'électrolyseur | 16 |
| 2.1.3.1 Electrolyseur alcalin..... | 16 |
| 2.1.3.2 Electrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) | 19 |
| 2.1.3.3 Electrolyseur à haute température..... | 22 |
| 2.1.3.4 Synthèse sur les différentes technologies d'électrolyse | 23 |
| 2.2 Alimentation de l'électrolyseur..... | 25 |
| 2.2.1 Alimentation en H ₂ O | 25 |
| 2.2.2 Alimentation électrique..... | 25 |
| 2.3 Stockage de l'hydrogène..... | 28 |
| 2.3.1 Stockage d'hydrogène par compression en réservoir/ bouteille..... | 28 |
| 2.3.2 Stockage solide..... | 30 |
| 2.3.3 Synthèse des différentes formes de stockages | 30 |
| 2.4 Raccordement a un réseau de distribution | 31 |
| 2.5 Devenir de l'oxygène | 32 |
| 2.6 Marché des électrolyseurs..... | 33 |
| 2.6.1 Applications dans le domaine de l'industrie | 33 |
| 2.6.2 Applications dans le domaine de la mobilité | 34 |
| 2.6.3 Application dans le domaine de l'énergie..... | 36 |
| 2.6.4 Electrolyseur : quels marchés ? Quelle évolution ? | 37 |
| 3. RETOUR D'EXPERIENCE ET SCENARIOS D'ACCIDENTS POSSIBLES.. | 39 |
| 3.1 Identification des risques | 39 |
| 3.1.1 Analyse de l'accidentologie..... | 39 |
| 3.1.1.1 Retour d'expérience sur la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau..... | 40 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.1.1.2 | Retour d'expérience sur les installations autour des électrolyseurs .. | 42 |
| 3.1.1.3 | Retours d'expérience sur le stockage d'hydrogène | 43 |
| 3.1.1.4 | Synthèse des enseignements de l'accidentologie | 43 |
| 3.1.2 | Evénements redoutes identifiés | 44 |
| 3.1.2.1 | Perte de confinement | 44 |
| 3.1.2.2 | Mélanges hydrogène /air | 44 |
| 3.1.2.3 | Mélange H ₂ /O ₂ | 45 |
| 3.1.2.4 | Réactivité des hydrures | 45 |
| 3.2 | Caractéristiques des scénarios accidentels..... | 46 |
| 3.3 | Mesures de maîtrise des risques | 47 |
| 3.3.1 | Mesures concernant l'implantation et l'aménagement | 47 |
| 3.3.2 | Exploitation – entretien | 53 |
| 3.3.3 | Dispositifs et consignes de sécurité | 54 |
| 3.3.4 | Mesures spécifiques a des environnements naturels et humains particuliers | 56 |
| 3.4 | Synthèse sur le retour d'expérience et l'analyse des risques..... | 58 |
| 4. | PRESENTATION DE LA REGLEMENTATION, DES NORMES, GUIDES ET AUTRES DOCUMENTS DE REFERENCE | 61 |
| 4.1 | Contexte normatif | 61 |
| 4.1.1 | Texte général relatif à la sécurité des systèmes à l'hydrogène..... | 62 |
| 4.1.2 | Textes relatifs aux stockages d'hydrogène | 62 |
| 4.1.2.1 | Stockage sous forme de gaz sous pression | 62 |
| 4.1.2.2 | Stockage sous forme d'hydrure | 63 |
| 4.1.3 | Textes spécifiques à l'électrolyse..... | 63 |
| 4.2 | Réglementation Européenne..... | 65 |
| 4.3 | Guides européens | 66 |
| 4.3.1 | Textes spécifiques pour certains pays européens | 67 |
| 4.4 | Textes spécifiques à l'Amérique du Nord | 68 |
| 4.4.1 | Etats-Unis | 68 |
| 4.4.1.1 | Contexte au niveau fédéral..... | 68 |
| 4.4.1.2 | Spécificités réglementaires au niveau des états..... | 70 |
| 4.4.1.3 | NFPA..... | 71 |
| 4.4.1.4 | International Fire Code | 71 |
| 4.4.1.5 | ASME | 72 |
| 4.4.1.6 | CGA..... | 72 |
| 4.4.1.7 | UL..... | 73 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4.2 Canada | 73 |
| 4.5 Textes spécifiques pour l'Asie | 74 |
| 4.5.1 Textes spécifiques à la Chine | 74 |
| 4.5.2 Textes spécifiques au Japon | 75 |
| 4.5.3 Textes spécifiques à la Corée du sud | 75 |
| 4.6 Synthèse du contexte réglementaire et normatif | 76 |
| 4.6.1 Importance de la normalisation | 76 |
| 4.6.2 Un cadre normatif et réglementaire qui se met en place..... | 77 |
| 4.6.2.1 Contexte en Europe..... | 78 |
| 4.6.2.2 Contexte en Amérique du Nord | 78 |
| 4.6.2.3 Contexte en Asie | 78 |
| 5. PROCESSUS D'AUTORISATION D'EXPLOITER | 79 |
| 5.1 Processus d'autorisation d'exploiter en France | 79 |
| 5.1.1 Rappel sur les rubriques applicables | 79 |
| 5.1.2 Vers une évolution réglementaire ? | 81 |
| 5.1.3 Interaction avec le cadre de mise en œuvre | 81 |
| 5.1.3.1 Power to gas : prescriptions de certains acteurs et limites | 81 |
| 5.1.3.2 Electrolyseur dans des établissements recevant du public (ERP)..... | 82 |
| 5.2 Processus d'autorisation d'exploiter dans différents pays | 83 |
| 5.2.1 Allemagne | 83 |
| 5.2.2 Suède | 86 |
| 5.2.3 Norvège | 87 |
| 5.2.4 Danemark | 89 |
| 5.3 Analyse comparée de la mise en application de l'IED dans différents pays de l'Union Européenne | 91 |
| 6. CONCLUSION | 93 |
| 7. LISTE DES ANNEXES | 95 |

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Dans le cadre de sa mission de service publique de l'état, l'INERIS réalise, pour divers secteurs d'activité, des études comparatives des réglementations, guides professionnels et normes applicables dans d'autres pays.

Le présent rapport concerne **les électrolyseurs et les stockages d'hydrogène associés**. Il vise à apporter un appui au Ministère de l'Environnement pour l'élaboration de la réglementation de ces installations qui sont en cours de développement en France.

L'étude vise à :

- **dresser un panorama des installations (technologies employées, quantités et capacités mises en œuvre), de leurs utilisations (équilibre réseau d'électricité, injection dans le réseau de gaz naturel...) et de leur potentiel de déploiement ;**
- **identifier les risques associés à ces installations et les principales fonctions de sécurité associées ;**
- **déterminer le cadre supra national (directives européennes) pouvant conduire à des obligations réglementaires en France et dans les états membres ;**
- **identifier les textes de référence (réglementations, guides ou normes) applicables aux électrolyseurs et aux stockages d'hydrogène ;**
- **décrire les processus d'autorisation de ces installations dans divers pays.**

L'étude est ciblée sur des pays ayant déjà des installations de production d'hydrogène tels que :

- en Europe : l'Allemagne, l'Angleterre, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, la France, la Norvège, les Pays Bas, la Suède et la Suisse ;
- en Amérique du Nord : le Canada et les Etats-Unis ;
- en Asie : la Chine, la Corée et le Japon.

Les informations figurant dans ce rapport sont issues :

- d'une analyse bibliographique de documents réglementaires, de normes, d'articles et de guides professionnels ;
- d'informations collectées au cours d'enquêtes réalisées sur la base de questionnaires envoyés :
 - aux fournisseurs et fabricants d'équipements du réseau AFHYPAC (Association Française pour l'HYdrogène et Piles A Combustibles) en France ;
 - aux autorités compétentes des pays étudiés ;
 - aux experts dans le secteur de l'hydrogène.

Détail sur les enquêtes réalisées dans le cadre de cette étude

Les enquêtes ont été effectuées par téléphone et par envoi de courriels. 60 personnes ont été contactées dont les activités se répartissent selon la Figure 1.

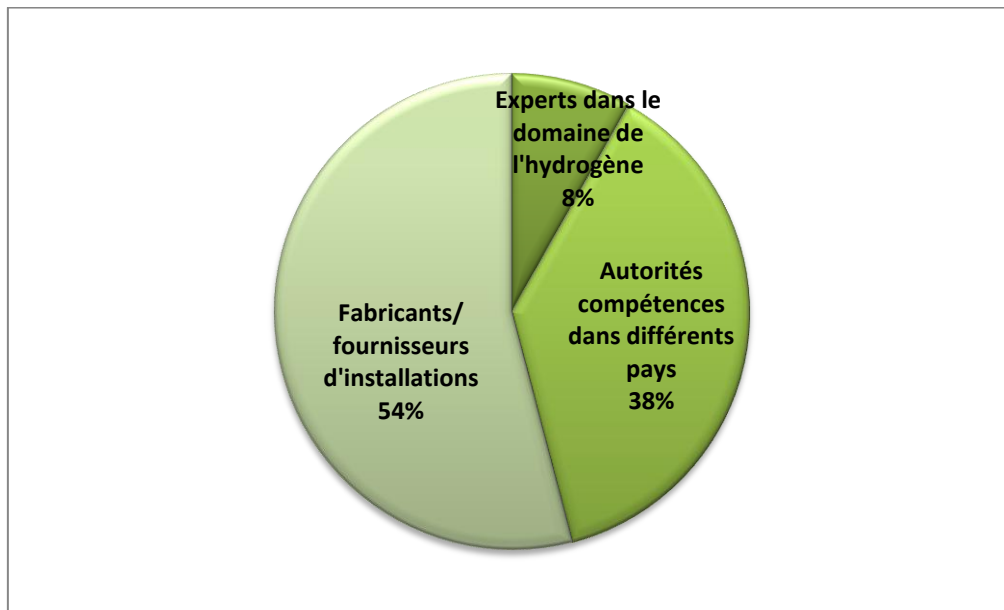


Figure 1 : Répartition des personnes contactées en fonction de leur activité

Les questionnaires étaient personnalisés en fonction des activités des personnes interrogées et les questions portaient sur les thématiques suivantes :

- les différentes technologies d'électrolyse et de stockage,
- les réglementations et guides qui s'appliquent dans chaque pays,
- les mesures de sécurité requises pour ces installations,
- les retours d'expériences acquis en termes de sécurité,
- les processus d'autorisation d'exploiter dans les différents pays,
- la transposition de la directive IED en Europe.

Au total, 24 réponses ont été reçues :

- 13 retours des industriels et fabricants dont 11 retours de l'APHYPAC,
- 6 retours des administrations,
- 5 retours des experts dans le domaine de l'hydrogène.

Les réponses ne sont pas détaillées dans ce chapitre mais seront utilisées à de multiples reprises pour illustrer ou étayer ce rapport.

Limite du rapport

Le présent rapport ne garantit pas l'exhaustivité des sources documentaires. Il présente cependant un panorama assez large des sources existantes comme l'ont confirmé les réponses au questionnaire.

1.2 CHAMP DES INSTALLATIONS CONCERNEES

Les électrolyseurs sont des installations ayant des applications variées.

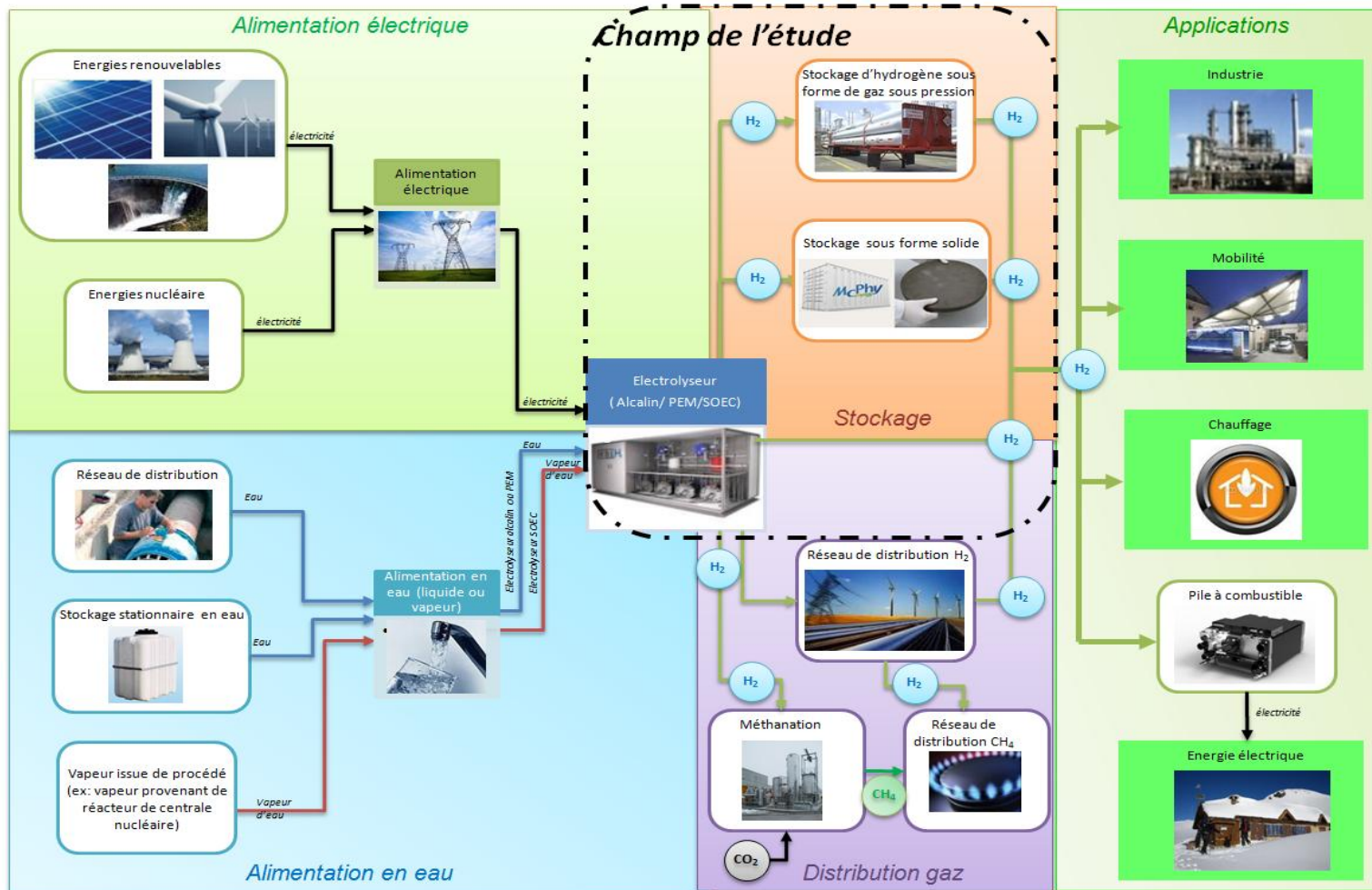


Figure 2 : Schéma de principe des modes d'alimentation des électrolyseurs et de leurs utilisations

Dans le premier chapitre de ce rapport, l'ensemble de la chaîne constituée de l'approvisionnement en énergie et en eau, de l'électrolyseur, du système de stockage et de l'utilisation finale de l'hydrogène est présenté afin de donner une image représentative de la technologie.

Par la suite, au niveau réglementaire notamment, le champ étudié s'est retreint aux composants suivants :

- les différentes technologies d'électrolyseur (alcalin/PEM et SOEC),
- les différents types de stockages de l'hydrogène (stockage sous forme de gaz sous pression et stockage sous forme d'hydrure).

Ont été exclus du champ de l'étude des textes réglementaires et normatifs :

- les différentes alimentations possibles d'un électrolyseur,
- les différentes utilisations en aval des électrolyseurs et/ou stockages,
- les réseaux de transport et de distribution,
- les stockages d'hydrogène sous forme liquide ou en cavité (cf. 2.3).

1.3 ORGANISATION DU RAPPORT

Après une description des installations et une analyse du retour d'expériences, le rapport présente les résultats de l'étude comparative en deux parties :

- La première qui reprend l'ensemble des documents applicables aux électrolyseurs et stockages d'hydrogène. Cette partie est rédigée afin d'identifier les textes de référence par rapport à leur domaine et l'étendue de leur application. Il a ainsi été choisi de présenter d'abord les documents ayant une portée sur plusieurs pays tels que les normes puis les spécificités par continent et par pays.
- La seconde qui décrit les processus d'autorisation d'exploiter pour chaque pays en se focalisant sur la transposition de la directive IED en Europe.

La première partie présente des exigences concernant les électrolyseurs et stockages d'hydrogène qui proviennent de sources variées :

- les réglementations générales telles que des directives européennes (directives concernant les atmosphères explosives, les équipements sous pression...)
- les normes internationales ISO spécifiques à l'emploi d'hydrogène, d'oxygène, aux électrolyseurs et stockage d'hydrogène ;
- les normes ou guides spécifiques à un pays ou à une association d'industriels.

Le panorama des sources applicables aux électrolyseurs et stockages d'hydrogène est donc très étendu et rassemble un grand nombre d'exigences. Il a donc été choisi de prioriser les sources selon deux critères :

- la spécificité des textes par rapport aux électrolyseurs et stockages d'hydrogène ;
- le caractère de référence du texte (ex. les ISO 22734-1/2 qui sont citées par les fabricants comme documents de références concernant les électrolyseurs).

Le rapport s'emploie donc à :

- décrire les installations d'électrolyse et les stockages associés (chapitre 2),
- identifier les retours d'expériences et l'accidentologie associés à ces installations (chapitre 3),
- présenter et analyser les documents applicables (chapitre 4),
- comparer les processus d'autorisation d'exploiter (chapitre 5),
- conclure et faire une synthèse des prescriptions (chapitre 6).

Les annexes suivantes sont présentées :

- retours d'expériences sur des installations mettant en œuvre de l'hydrogène (annexe 1),
- ISO TC197 Comité de Normalisation internationale des technologies hydrogène (annexe 2),
- normes générales s'appliquant aux électrolyseurs (annexe 3),
- processus d'autorisation en Norvège (annexe 4),
- glossaire (annexe 5).

2. INSTALLATIONS D'ELECTROLYSE ET STOCKAGES D'HYDROGENE ASSOCIES

Cette partie est consacrée à la présentation des installations d'électrolyse et des stockages d'hydrogène. Dans un premier temps nous présenterons les différents procédés de production d'hydrogène et, plus particulièrement, les différents types d'électrolyseurs. Puis nous décrirons le devenir de l'hydrogène et de l'oxygène à la sortie de l'électrolyse. Enfin, nous présenterons les différents secteurs d'activité où ces technologies sont employées.

2.1 PRODUCTION D'HYDROGENE

2.1.1 PROCEDES DE PRODUCTION D'HYDROGENE

D'un point de vue économique, l'hydrogène est un vecteur énergétique. Il est nécessaire de le fabriquer à partir d'une source d'énergie existante (méthane, électricité etc.) avant de l'utiliser ou éventuellement le stocker. On y parvient par divers procédés : par reformage ou gazéification d'hydrocarbures, par électrolyse de l'eau ou par voie thermochimique. Le choix du procédé se fait en fonction de nombreux paramètres : prix de l'énergie primaire, pureté demandée, débit...

La très grande majorité de la production d'hydrogène (95%) se fait par reformage.¹ Deux types de procédés se distinguent :

- le reformage à la vapeur qui consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O et autres impuretés)² ;
- le reformage de gaz naturel, procédé par lequel le méthane combiné à la vapeur d'eau est transformé en hydrogène et dioxyde de carbone.

L'inconvénient du reformage est un bilan carbone défavorable (8,62 kg de CO₂ émis dans l'atmosphère pour 1 kg d'hydrogène produit pour le reformage de gaz naturel).³

La dissociation thermochimique⁴ est un procédé de décomposition directe de l'eau par apport d'énergie sous forme thermique. Cette technologie est actuellement en développement en laboratoire.

L'électrolyse représente aujourd'hui une faible portion de la capacité totale de production de l'hydrogène, principalement en raison du coût qui est plus important que pour les procédés de reformage.

¹ Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire- Septembre 2014- 11 p. - 238 p.- EE Consultant, HESPUL, SOLAGRO

² Comment produire l'hydrogène ? la production à partir de combustibles fossiles-C. Baudouin, S. His et J-P Jonchère- CLEFS CEA-N°50/51- HIVER 2004-2005

³ TECHNICAL SUPPORT DOCUMENT FOR HYDROGEN PRODUCTION: PROPOSED RULE FOR MANDATORY REPORTING OF GREENHOUSE GASES, Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency August 5th 2008

⁴ Production d'hydrogène par dissociation thermochimique de l'eau- CEA-AFHYPAC- révision octobre 2014

Le recours croissant aux sources renouvelables conduit aujourd'hui au développement de l'électrolyse, procédé séduisant pour la valorisation des énergies intermittentes⁵.

2.1.2 PRINCIPE DE L'ELECTROLYSE DE L'EAU

L'électrolyse de l'eau fait partie des procédés électrochimiques. L'hydrogène et l'oxygène sont produits aux électrodes. L'énergie électrique est utilisée pour la décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène selon la réaction suivante :



L'enthalpie nécessaire pour la décomposition de l'eau à 25°C est $\Delta H=286$ kJ/mole d' H_2 produit. Le Tableau 1 présente quelques exemples d'enthalpies nécessaires à la production d'hydrogène pour des procédés alternatifs.

| Procédé | Matière première | Energie consommée [kJ/mole d' H_2 produit] |
|---------------------------------------|------------------------------------|---|
| Electrolyse ou dissociation thermique | H_2O | 286 |
| Reformage à l'eau | $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ | 61 |
| Gazéification du charbon | $\text{C} + \text{H}_2\text{O}$ | 85 |
| Gazéification de la biomasse | $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4$ | 70 |

Tableau 1 : Energie minimale nécessaire pour la production d'hydrogène⁶

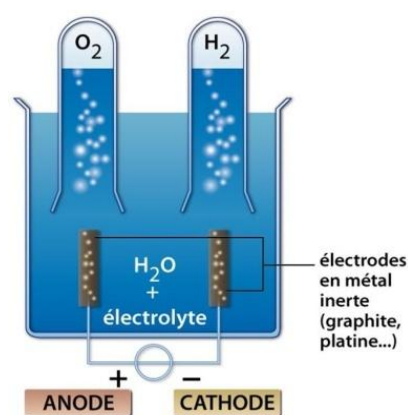


Figure 3 : Schéma de principe de l'électrolyse de l'eau⁷

Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode, conducteurs électriques) reliées à un générateur de courant continu, et séparées par un électrolyte (qui permet le transfert d'ions dans la réaction).

Cet électrolyte peut être :

- soit une solution aqueuse acide ou basique,
- soit une membrane polymère échangeuse de protons,
- soit une membrane céramique conductrice d'ions O^{2-} .

⁵ Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau- Mémento de l'hydrogène- Fiche 3.2.1- AFHYAC- Mai 2013

⁶ Rapport INERIS – les techniques de production de l'hydrogène par électrolyse et les risques associés- 20/06/2011 par B. Weinberger

⁷ <http://www.larousse.fr/encyclopedie/images>

Les modules d'électrolyse (pour les électrolyseurs alcalins et PEM) comprennent plusieurs unités qui sont représentées sur le schéma de procédé en Figure 4.

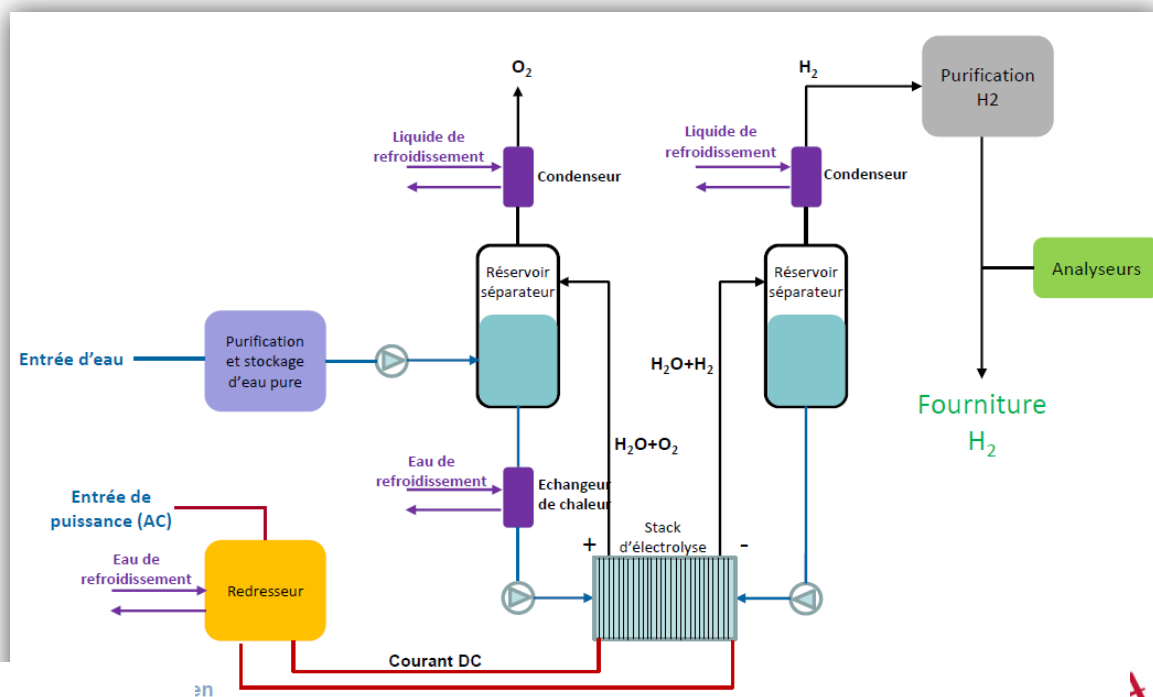


Figure 4 : Schéma simplifié d'un électrolyseur type alcaline et PEM⁸

| | |
|---|---|
| Redresseur | Le redresseur convertit une puissance électrique alternative en une puissance électrique redressée. C'est un convertisseur de courant alternatif en courant continu. |
| Stack d'électrolyse | Le « stack » est un empilement de cellules d'électrolyse, cœur de la réaction de production d'hydrogène. |
| Séparateur et condenseur hydrogène | Ces étapes permettent de séparer la phase liquide et l'hydrogène produit. L'eau présente dans le gaz est condensée et retirée en partie. |
| Séparateur et condenseur Oxygène | Ces étapes permettent également de séparer la phase liquide et l'oxygène produit et d'enlever l'eau présente dans le gaz. |
| Purification d'hydrogène | Le système de purification permet de retirer de l'hydrogène des traces de produits restants comme l'eau, l'oxygène ou l'électrolyte tel que le KOH. Différentes techniques sont appliquées comme l'absorption dans des zéolithes ou la recombinaison catalytique. |

⁸ AREVA H2Gen : La production d'hydrogène par électrolyse- F.Auprêtre- Décembre 2014
Remarque : l'alimentation en eau n'est pas exclusivement coté oxygène

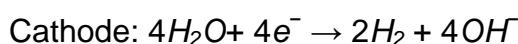
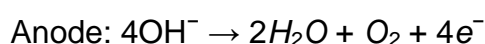
2.1.3 TECHNOLOGIES D'ÉLECTROLYSEUR

Actuellement, il existe 3 principales technologies d'électrolyseurs sur le marché : alcalines, PEM (Proton Exchange Membrane) et SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell).

2.1.3.1 ÉLECTROLYSEUR ALCALIN

La technologie alcaline est aujourd'hui développée sur le plan industriel pour la production massive d'hydrogène. En France, des unités de plusieurs mégawatts ont été construites depuis la fin des années 1970 pour différentes applications⁹.

Ce type d'électrolyseur utilise en général une solution d'hydroxyde de potassium concentrée (KOH). L'ion OH⁻ sert pour le transfert de charges entre les électrodes où se produisent les réactions suivantes :



Pour permettre la séparation des gaz hydrogène et oxygène, les deux électrodes sont séparées par un diaphragme (ou membrane). Le diaphragme doit permettre le passage de l'eau et des ions, mais pas des gaz.

L'hydroxyde de potassium étant une base forte, elle corrode bon nombre de matériaux, les électrodes sont généralement en nickel voire en cobalt.¹⁰

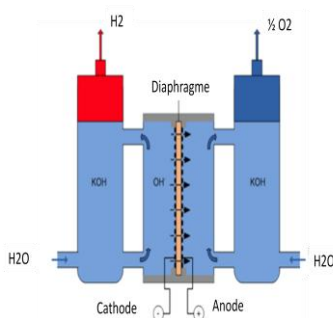


Figure 5 : Electrolyseur alcalin



Figure 6 : Electrolyseur alcalin standard¹¹

Les gaz produits contiennent des impuretés qui proviennent de la solution alcaline, de l'oxygène et de l'eau et doivent donc être traitées : l'hydrogène extrait de la mixture à la sortie de l'électrolyseur par des séparateurs est donc lavé pour retirer les traces de KOH, puis épuré pour éliminer les traces d'oxygène et enfin séché. Au final le degré de pureté obtenue est supérieur à 99%¹².

⁹ Pierre MILLET, Électrolyseurs de l'eau à membrane acide, Technique de l'Ingénieur, Référence J4810

¹⁰ SGC, 2013. Power to Gas - a technical review (No. 2013:284). SGC, Malmö.

¹¹ J.Ivy - Summary of Electrolytic Hydrogen Production- Milestone Completion Report –NREL- Appendix A: Overview of current Electrolysis Systems- p18 -21

¹² Müller-Syring, G., Köppel, W., Mlaker, H., Sterner, M., Höcher, T., 2013. Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. DVGW.

Le rendement de conversion moyen des électrolyseurs alcalins qui correspond au rapport entre la puissance chimique délivrée par le débit d'hydrogène (en pouvoir calorifique supérieur - PCS) et la puissance électrique de l'électrolyseur complet¹³ est de l'ordre de 70% PCS et peut être supérieure pour les grosses unités.

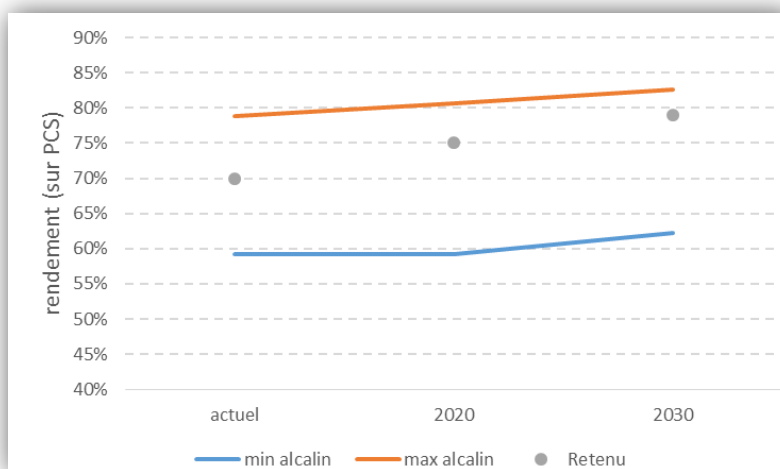


Figure 7 : Evolution des rendements des électrolyseurs alcalins¹⁴

Les électrolyseurs alcalins fonctionnent usuellement à des pressions faibles (inférieures à 10 bar), l'hydrogène étant ensuite comprimé pour être stocké ou utilisé. Cette étape de compression est coûteuse du point de vue de l'investissement nécessaire et de la consommation énergétique : c'est pour éviter cette phase de compression et optimiser globalement le procédé que les fabricants ont développé des électrolyseurs pressurisés fonctionnant à une pression de 10 à 30 bar voire pour les dernières générations 30 à 50 bar. Ainsi, la montée en pression des fluides se fait en phase liquide (sur l'eau), ce qui permet d'éviter totalement ou partiellement le recours à un compresseur et de réduire en conséquence les coûts totaux de la production et du stockage d'hydrogène.

Pour les stacks identifiés dans cette étude, les débits nominaux d'hydrogène peuvent aller jusqu'à 750 Nm³/h (environ 3,8 MWe¹⁵). La plus grande installation d'électrolyse dépasse les 30 000 Nm³/h (environ 150 MWe) et a été déployée dans l'industrie des engrais (Statoil, 2008).

Historiquement l'électrolyse alcaline était exploitée en fonctionnement continu. Il semble néanmoins qu'elle puisse fonctionner convenablement en variation de charge avec typiquement une plage de fonctionnement de 20 à 100% de la puissance nominale, et certains développements actuels affichent même une plage de 5 à 110%.¹⁶

¹³ Rendement = Débit H2 [Nm³/h] x PCS H2 (3,55 kWh/Nm³) / Puissance électrique [kW]

¹⁴ Smolinka, T., Günther, M., Garche, J., 2011. Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Erstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Fraunhofer ISE, FCBAT, Allemagne

¹⁵ La puissance électrique NETTE (exprimée en MWe) est calculée en retirant de la puissance brute la puissance électrique réinjectée dans la centrale

Pour le démarrage à froid, la production d'hydrogène n'est pas immédiate et nécessite 10 à 20 minutes de stabilisation. D'après la société Etogas (industriel allemand), ce problème peut être contourné d'abord par une bonne isolation permettant de maintenir pour les arrêts de courte durée une température de 30°C suffisante pour un démarrage de la production d'hydrogène en quelques secondes, puis si besoin en ayant recours à une source extérieure de chaleur à basse température pour faire face aux arrêts plus longs.

La durée de vie moyenne des électrolyseurs alcalins est de l'ordre de 50 000 à 60 000¹⁶ heures de fonctionnement. L'usure se fait principalement au niveau de la membrane (diaphragme) et des électrodes : une révision de la pile (stack) est donc possible en fin de vie théorique pour prolonger l'utilisation de l'équipement. Les développements en cours devraient améliorer ce point, sachant en outre que des durées de vie plus longues pouvant aller jusqu'à 90 000 heures ont déjà été observées sur les grosses installations fonctionnant en régime continu.¹⁶

Synthèse de l'électrolyseur alcalin

| | |
|--|---|
| | Anode : $4HO^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ |
| | Cathode : $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4HO^-$ |
| | Electrolyte : 30% de KOH |
| | Pression : 1 à 50 bar |
| | Température : 60 à 90°C |

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| Technologie mature | Electrolyte liquide corrosif KOH. Risque important de fuite de KOH |
| Durée de vie importante (50 000 à 60 000 heures) | Pression de fonctionnement (50 bar maximum) plus faible que pour le PEM |
| Gaz de haute pureté | Faible intolérance aux impuretés dans l'eau |
| Catalyseurs à base de nickel (coût faible par rapport au PEM) | Par rapport à l'électrolyseur PEM, plage de fonctionnement réduite (20 à 110%) et temps de réponse important pour le démarrage à froid |

Tableau 2 : Synthèse sur les électrolyseurs alcalins

¹⁶ Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire- Septembre 2014- 11 p. - 238 p.- EE Consultant, HESPUL, SOLAGRO

2.1.3.2 ELECTROLYSEUR PEM (PROTON EXCHANGE MEMBRANE)

Le développement des électrolyseurs PEM est plus récent et ils sont actuellement en plein essor.

Dans une cellule d'électrolyseur PEM, les deux électrodes (anode et cathode) sont séparées par un film polymère conducteur protonique (membrane) comme le montre la Figure 8.

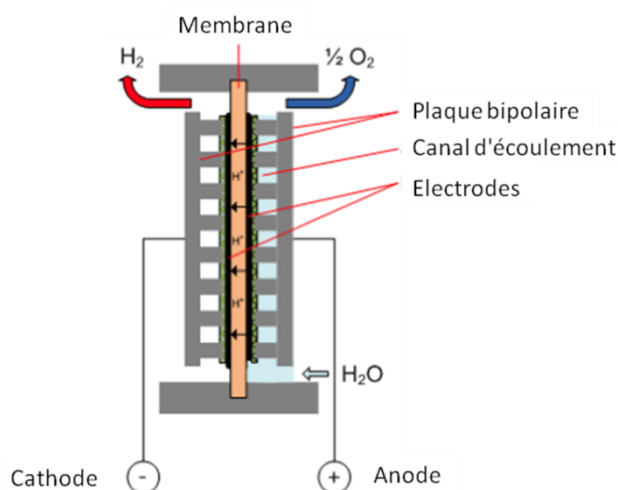


Figure 8 : Monocellule électrolyseur PEM

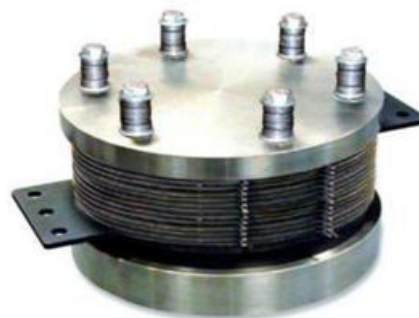
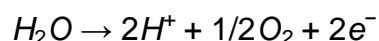
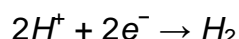


Figure 9 : Stack d'électrolyseur PEM¹⁷

Deux électrodes métalliques microporeuses sont déposées à la surface des deux faces de la membrane. L'ensemble est immergé dans de l'eau déminéralisée. Lorsqu'une différence de potentiel électrique suffisante est appliquée entre ces deux électrodes, l'électrolyse se produit. L'eau est oxydée à l'anode selon la réaction :



Les protons migrent à travers la membrane sous l'effet du champ électrique et viennent se réduire à la cathode selon la réaction :



La membrane est constituée d'un polymère. Les électrodes sont recouvertes de catalyseurs constitués de métaux rares de type platine ou iridium.¹⁸ Ces deux particularités rendent cette solution plus coûteuse actuellement, mais des gains importants de performance sont attendus, notamment une augmentation de la densité de courant, ce qui permettra d'augmenter la capacité des électrolyseurs à quantité identique de matériaux. Autrement dit, la priorité des recherches actuelles n'est pas forcément de remplacer ces matériaux, l'impact sur le rendement serait contreproductif, mais d'en utiliser le moins possible¹⁹.

¹⁷ Site internet : Hydrogenics 'www.hydrogenics.com'

¹⁸ EASE, EERA, 2013. Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Road map towards 2030.

¹⁹ Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire- Septembre 2014- 11 p. - 238 p.- EE Consultant, HESPUL, SOLAGRO

Par ailleurs, 99% des métaux des électrodes peuvent être recyclés en fin de vie, mais les procédés actuels imposent d'incinérer l'ensemble membrane+électrode : les métaux sont récupérés dans les résidus, mais le matériau de la membrane est détruit. Des recherches visant à trouver un procédé permettant de recycler aussi la membrane sont en cours.²⁰

La technologie PEM s'est développée en raison de sa compacité et de la grande pureté de sa production (H_2 mais aussi O_2)²¹ : le traitement des gaz produits se trouve donc simplifié comparé à la technologie alcaline, puisqu'il consiste essentiellement à retirer les traces d'oxygène et d'eau.

Les rendements de conversion sont théoriquement plus élevés que l'alcalin même si actuellement on enregistre un même niveau de rendement d'environ 70% (PCS). Cette technologie récente dispose encore de potentiels importants d'amélioration liés au perfectionnement de la technologie, mais aussi par effet d'échelle, étant donné que les unités actuellement vendues sont de petites capacités et fabriquées en petites séries.

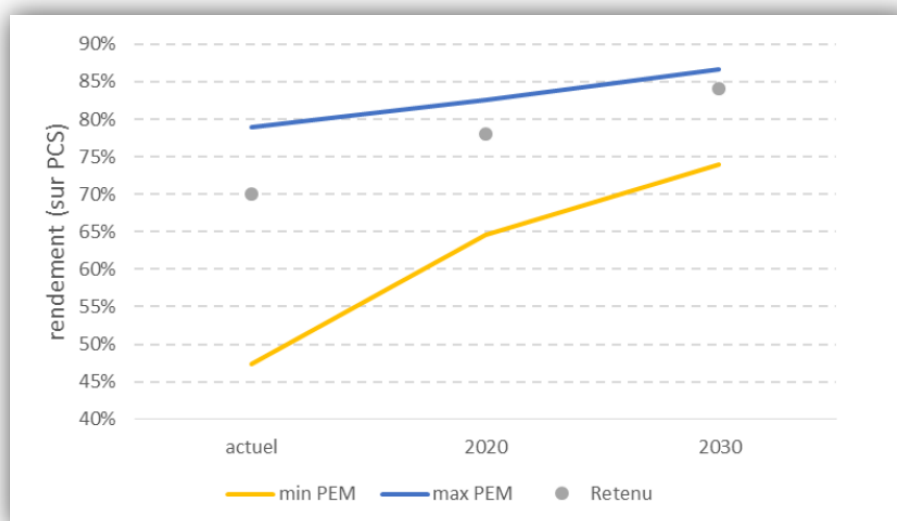


Figure 10 : Evolution du rendement des électrolyseurs PEM²²

Aujourd'hui, les plus gros électrolyseurs PEM en fonctionnement ont une capacité de 60 Nm³/h (env. 300 kWe) avec des stacks d'une capacité maximale de 10 à 15 Nm³/h, mais de plus grosses unités sont en cours de développement ayant des capacités de l'ordre de 1 MWe (env. 200 Nm³/h).

²⁰ Auprêtre, F., 2014. Interview CETH2.

²¹ Auprêtre, F., 2013. Production d'hydrogène par Electrolyse PEM.

²² Smolinka, T., Günther, M., Garcke, J., 2011. Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Erstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Fraunhofer ISE, FCBAT, Allemagne.

La technologie PEM présente l'intérêt de pouvoir fonctionner sur une large plage de puissance, depuis un minimum technique de 5% jusqu'à une surcapacité ponctuelle de 110 à 130%.²³ Les réponses dynamiques montrent par ailleurs que la PEM est mieux adaptée que l'alcalin à des variations rapides de charge.²⁴ Enfin, l'électrolyseur PEM présente un temps de démarrage à froid plus court que son concurrent alcalin.

Le principal défaut de la technologie PEM est sa faible durée de vie, actuellement de l'ordre de 20 000²⁵ à 40 000 h²⁶ les garanties constructeurs se situant entre 10 000 et 35 000 h²⁷ et incluant une baisse de rendement maximum de 5 à 10%. Les retours d'expérience en fonctionnement réel ont tendance à être plus pessimistes, mais là encore, les performances devraient évoluer vers des durées de vie de 50 000 h à 100 000 h à plus ou moins long terme.

Synthèse de l'électrolyseur PEM

| | |
|--|---|
| | Anode : $H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$ |
| | Cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ |
| | Spécificité : membrane solide échangeuse d'électron |
| | Pression: 1 à 80 bar |
| | Température : 55 à 80°C |

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| Gaz de haute pureté | Cher (catalyseur à base de métaux nobles (Pt, Ir) et membrane en polymère) |
| Fonctionnement sous pression | Faible durée de vie |
| Faible temps de réponse au démarrage à froid | Faible tolérance aux impuretés dans l'eau |
| Large plage de fonctionnement (5 à 130%) | Technologie « jeune » |
| Fort potentiel d'évolution | |

Tableau 3 : Synthèse sur les électrolyseurs PEM

²³ Reiner, A., SIEMENS AG, 2013. PEM electrolyzer - a promising technology to handle fluctuating.

²⁴ Gahleitner, G., 2013. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. International Journal of Hydrogen Energy 38, 2039–2061. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.010

²⁵ Smolinka, T., Günther, M., Garcke, J., 2011. Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Erstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Fraunhofer ISE, FCBAT, Allemagne.

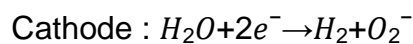
²⁶ Smeets, F., Verkoeyen, G., 2013. Interview Hydrogenics.

²⁷ Auprêtre, F., 2013. Production d'hydrogène par Electrolyse PEM.

2.1.3.3 ELECTROLYSEUR A HAUTE TEMPERATURE

La technologie SOEC (solid oxide electrolyzer cell), qui en est aujourd'hui à un stade moins avancé vise de hauts rendements de conversion d'électricité en hydrogène. La société allemande Sunfire (Dresde) construit actuellement un pilote « Power-to-Liquid » intégrant un électrolyseur SOEC qui devrait démarrer fin 2016 mais sa commercialisation ne se fera probablement pas avant 2025 voire 2030.²⁸

Le principe consiste à réaliser l'électrolyse à haute température (700 à 800°C), ce qui permet de réduire fortement la consommation d'électricité. Un apport de chaleur est nécessaire, mais la majorité de cette chaleur peut être récupérée sur les gaz produits. Toutefois, les hautes températures nécessitent l'utilisation de matériaux spécifiques : c'est pourquoi l'électrolyte et les électrodes sont conçus à base de céramiques. La vapeur d'eau est introduite à la cathode où sont produits l'hydrogène et les anions superoxydes O_2^- :



Les anions O_2^- migrent à travers la membrane électrolytique vers l'anode et en se déchargeant forment de l'oxygène :

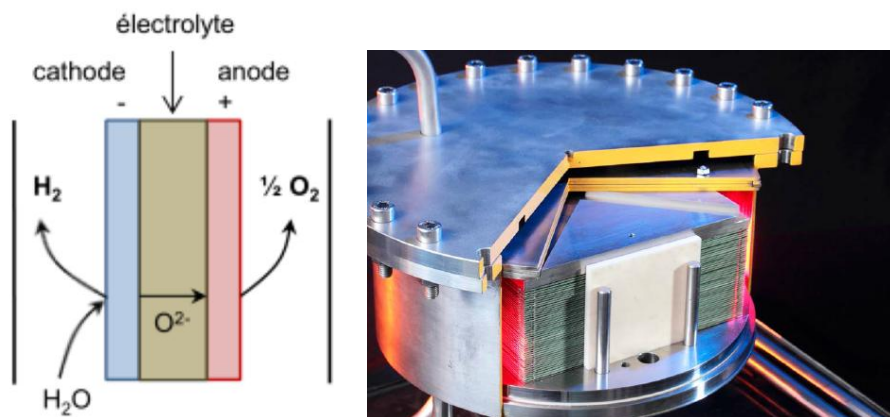
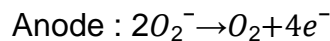


Figure 11 : Principe d'une cellule d'électrolyse SOEC²⁹

Une spécificité de l'électrolyseur SOEC réside dans le fait qu'il est réversible et peut donc fonctionner en mode « pile à combustible ». Ainsi, le même système permet à la fois de convertir de l'électricité en hydrogène mais aussi, à d'autres moments, de produire de l'électricité à partir d'hydrogène.

En termes de performance, le rendement de conversion électricité d'hydrogène pourrait atteindre 100% (PCS), mais si l'on prend en compte la chaleur apportée, le rendement de conversion électricité + chaleur d'hydrogène serait de l'ordre de 85% PCS.³⁰

²⁸ Baurens, P., 2013. Interview CEA-Liten.

²⁹ Petitpas, F., 2013. Electrolyseurs du futur (SOEC).

La Recherche – Hydrogène- Franck Barnu- Novembre 2013/ N°481/3

³⁰ De Saint Jean, M., 2013. Power-to-gas process with high temperature electrolysis and CO2 methanation - CEA. / Wix, C., 2013. Power upgraded biogas - the catalytic way.

La durée de vie liée en particulier à la fragilité des céramiques reste un défi majeur (le cyclage thermique dans le cas d'utilisations intermittentes sans système de maintien en température étant un facteur aggravant).

Synthèse de l'électrolyseur SOEC

| | |
|--|--|
| | Cathode : $H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$ |
| | Anode : $2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$ |
| | Electrolyte et électrodes en céramique |
| | Pression : 5 à 30 bar |
| | Température : 600 à 800°C |

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| Rendement important | Fragilité des matériaux |
| | Nécessité d'un apport de chaleur important |
| Gaz de haute pureté | Temps de démarrage à froid long |
| | Pression de fonctionnement limitée |
| Réversibilité possible : fonctionnement en mode pile à combustible | Durée de vie limitée des céramiques |
| | Technologie en cours de développement |

Tableau 4 : Synthèse sur les électrolyseurs SOEC

2.1.3.4 SYNTHÈSE SUR LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES D'ÉLECTROLYSE

Pour réaliser cette réaction, 3 technologies d'électrolyseur existent : alcaline, PEM (Proton Exchange Membrane) et SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell).

La première est une technologie mature et largement diffusée dans l'industrie. La seconde, plus récente, est de plus en plus répandue. La dernière (SOEC), fonctionnant à haute température, n'est pas sortie des laboratoires. Elle se différencie principalement par la substitution d'une partie de l'électricité nécessaire à la dissociation de l'eau par de la chaleur. L'efficacité énergie chimique/énergie électrique se trouve ainsi améliorée.

| | | Alcalin | | | PEM | | | SOEC | | |
|--|--------------------|--|-------------|-------------|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | | | | | | | | | | |
| Anode | | $4\text{HO}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$ | | | $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$ | | | $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$ | | |
| Cathode | | $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 4\text{HO}^-$ | | | $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ | | | $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$ | | |
| Electrolyte | | Electrolyte liquide (KOH ou NaOH) | | | Polymère solide | | | Oxydes céramiques solides | | |
| Electrodes | | Electrodes Ni/Fe | | | Métaux nobles (Pt, Ir...) | | | Céramique dopé Ni | | |
| Pureté H₂ | % | 99,50% | | | 99,95% | | | 99.4 | | |
| Démarrage à froid | | 10- 20 minutes sauf si maintien à température | | | < 10 min | | | | | |
| Débit maximal d'H₂ | Nm ³ /h | 0,25 à 750 | | | 0,01 à 240 | | | 0,1 à 1 | | |
| Puissance électrique | kW | Environ 1,25 à 3 800 | | | Environ 0,05 à 1 200 | | | Environ 0,5 à 5 | | |
| Pression | bar | 1 à 50 | | | 1 à 80 | | | 5 à 30 | | |
| Température | °C | 60 à 90 | | | 55 à 80 | | | 600 à 800 | | |
| | | Actuel | 2020 | 2030 | Actuel | 2020 | 2030 | Actuel | 2020 | 2030 |
| Rendement de conversion Electricité -> H₂ (PCS) | % | 70% | 75% | 79% | 70% | 78% | 84% | - | - | 100 % |
| Avantages | | Technologie mature Prix | | | Rapidité de variation de charge et démarrage à froid Grande plage de fonctionnement compacité | | | Rendement élevé Réversibilité possible : fonctionnement en mode pile à combustible | | |
| Inconvénients | | Réponse dynamique moins rapide que le PEM mais amélioration en cours Utilisation de produit corrosif (KOH/NaOH) | | | Durée de vie limitée Technologie récente Prix élevé Recours à des métaux rares | | | Loin du stade commercial Durée de vie | | |

Tableau 5 : Tableau comparatif des 3 technologies

Les technologies commercialisées connaissent des développements selon deux axes principaux : l'augmentation des pressions de sortie, pour éviter les étapes de compression, notamment pour les applications liées à la mobilité, et, pour le Power-to-gas, les électrolyseurs de grosse capacité (de l'ordre du méga Watt).

Des procédés innovants sont actuellement développés en marge de ces trois technologies comme par exemple un électrolyseur hybride PEM/alcalin ou une technologie de production basée sur l'électrochimie du zinc.

2.2 ALIMENTATION DE L'ELECTROLYSEUR

Les deux principaux ingrédients de l'électrolyse sont l'eau et l'électricité.

2.2.1 ALIMENTATION EN H₂O

L'alimentation des électrolyseurs en eau peut être :

- soit sous forme liquide (électrolyseur basse température : alcalin ou PEM),
- soit sous forme vapeur (électrolyseur haute température).

Pureté de l'eau

Le niveau de pureté de l'eau est un facteur important à assurer car les impuretés perturbent les réactions électrochimiques : c'est pourquoi l'électrolyseur est alimenté en eau déminéralisée par une unité de traitement de l'eau.

La pureté de l'eau peut être rapidement évaluée après traitement sur la base de la conductibilité ou la résistance électrique - l'eau pure est un très mauvais conducteur électrique, sa résistance est donc haute. Pour l'électrolyseur, la conductivité ionique doit être inférieure à quelques $\mu\text{S}/\text{cm}$.³¹

| Qualité | Eau Ultra-Pure | Eau Pure | Eau Purifiée |
|--------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Résistivité | 10-18 M Ω .cm | 1-10 M Ω .cm | 1-0.02 M Ω .cm |
| Conductivité | 0.1-0.0555 $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 1.0-0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 1-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ |

Tableau 6 : Exemple de caractéristiques de pureté de l'eau³²

Pour les électrolyseurs, la norme ISO 22734-1 ne spécifie pas de caractéristiques pour l'eau. Elle stipule que le fabricant doit définir les spécifications de l'eau d'alimentation à utiliser dans le générateur d'hydrogène.

2.2.2 ALIMENTATION ELECTRIQUE

Au niveau mondial, l'alimentation électrique provient de trois sources d'énergie à notre disposition : les fossiles, le nucléaire et les énergies renouvelables :

Les fossiles (le charbon, les gaz de schistes et le pétrole) connaissent un renouveau pour des raisons économiques. Mais, par définition, ils sont en quantité finie et leur épuisement - même s'il est actuellement retardé - est inéluctable à l'échelle d'un siècle ou deux, sans oublier leur impact climatique, sur la santé et l'environnement.

³¹ Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau- Mémento de l'hydrogène- Fiche 3.2.1- AFHYPAC- Mai 2013

³² Site internet : <http://www.lenntech.fr/>

- **Le nucléaire** est dans une situation partiellement comparable : la filière de la fission a aussi des ressources limitées, même si les spécialistes pensent pouvoir repousser l'échéance de leur épuisement de quelques siècles grâce à la filière surgénératrice. Par contre, la filière de la fusion contrôlée, qui devrait être validée dans la seconde moitié de ce siècle, pourrait être socialement mieux acceptée : elle génère moins de déchets qui sont moins nocifs et serait quasi renouvelable à l'échelle de millions d'années, grâce aux ressources immenses en deutérium disponibles dans l'eau de mer. En contrepartie, cette filière présente l'inconvénient d'une production nécessairement très centralisée et se heurte à l'opinion publique de plus en plus réticente à cette technologie depuis l'accident nucléaire de Fukushima.
- **Les énergies renouvelables** diffèrent par leurs origines et peuvent être classées en trois domaines :
 - *les énergies géothermiques* exploitant la chaleur contenue dans notre sous-sol ;
 - *les énergies gravitationnelles* dues à l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil, et qui se manifestent par les marées et certains courants marins ;
 - *les énergies solaires* issues du rayonnement photonique, qu'elles soient directes (exploitation des photons), ou indirectes, c'est à dire issues du fonctionnement de la machine atmosphérique solaire (la biomasse, l'hydraulique, la thermique, le photovoltaïque, l'éolien, ...).

Leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes, les énergies solaires ayant une potentialité très supérieure à celles des deux autres formes d'énergies renouvelables.

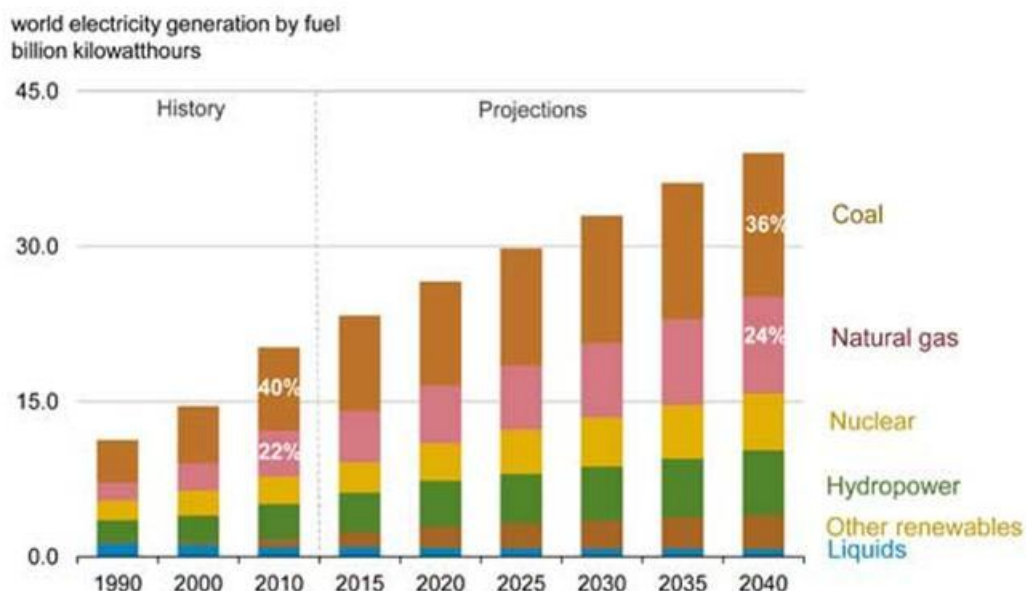


Figure 12 : Croissance de la production d'électricité selon les prévisions de l'agence internationale d'énergie³³

³³ EIA, International Energy Outlook 2013

Selon les prévisions de l'AIE, les énergies renouvelables et le gaz naturel sont les sources avec le plus de croissance dans la génération d'électricité au niveau mondiale jusque à 2040, cependant le charbon reste la source dominante.

Electrolyseurs et énergies renouvelables :

Si les productions électriques alimentées à partir d'une énergie stockée (hydraulique, thermique, géothermique) sont contrôlées, les autres sont soit aléatoires (éolienne, photovoltaïque), soit périodiques (gravitationnelle) et de ce fait doivent être partiellement ou totalement stockées. Mais l'électricité ne se stocke pas en grandes quantités, aussi est il nécessaire de la transformer en un vecteur qui soit stockable, comme l'est **l'hydrogène**. Celui-ci est en effet un gaz aux multiples vertus énergétiques qui est aisément fabriqué via l'électrolyse de l'eau. Selon l'APHYPAC, c'est là une des voies les plus intéressantes et prometteuses pour le stockage des énergies renouvelables (cf. des exemples de projet européens Tableau 7).

| Nom du projet/ de l'installation | Année | Lieu | Pays | Energie renouvelable | Lien |
|--|-------|---|------------|---|---|
| MYRTE | 2011 | Ajaccio (Corse) | France | Photovoltaïque | http://myrte.univ-corse.fr/ |
| CENTRALE ELECTRIQUE HYBRIDE | 2011 | Prenzlau (Berlin) | Allemagne | Eolienne Biogaz | https://www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html |
| INSTALLATION POWER TO GAS | 2011 | Falkenhagen (Frankfort) | Allemagne | Eolien | http://www.ingenieur.de/Themen/Energiespeicher/Energieanlage-in-Frankfurt-verwandelt-Strom-in-Wasserstoff |
| CREATIVE ENERGY HOMES (CEH) | 2011 | Nottingham | Angleterre | Photovoltaïque Eolienne Géothermique | https://www.nottingham.ac.uk/engineering/departments/abe/undergraduate/profiles/creativeenergyhomesproject.aspx |
| PETAWATT ENERGY- Electrygen Pty LTd | 2014 | Etat du Queensland | Australie | Photovoltaïque Eolienne Hydraulique | http://www.mcphy.com/en/news/releases/power-to-power-mcphy-energy-sells-its-integrated-solid-hydrogen-production-storage-solution-to-the-australian-firm-petawatt-energy-1145/ |
| INGRID | 2014 | Pouilles | Italie | Photovoltaïque Eolienne | http://www.ingridproject.eu/ |
| GRHYD | 2014 | Dunkerque | France | Photovoltaïque Eolienne | http://www.gdfsuez.com/innovation-transition-energetique/gestion-intelligente-energie/power-to-gas/projet-demonstration-grhyd/ |
| PUSHY | 2015 | Port-Mort (Eure) | France | Hydraulique | http://www.sortirdupetrole.com/societe/210-hydroelectricite-au-bord-de-la-riviere-solidifiera-de-l-hydrogene |
| REFUGE DU COL DU PALET | 2015 | Parc national de la Vanoise (Savoie) | France | Photovoltaïque | http://www.vanoise-parcnational.fr/fr/les-actions-du-parc/actualite-du-parc/633-aunonomie-energetique-du-refuge-du-col-du-palet-une-premiere-en-france-.html |

Tableau 7 : Quelques exemples d'installation et projets d'électrolyseurs couplés à des ENR

2.3 STOCKAGE DE L'HYDROGENE

Les techniques de stockage utilisables pour l'hydrogène sont diverses :

- le stockage sous forme de gaz comprimé ou de liquide cryogénique qui sont des technologies éprouvées ;
- le stockage dans les solides, l'hydrogène étant alors absorbé ou adsorbé par un solide, technologie en cours de déploiement industriel ;
- le stockage par réaction chimique.

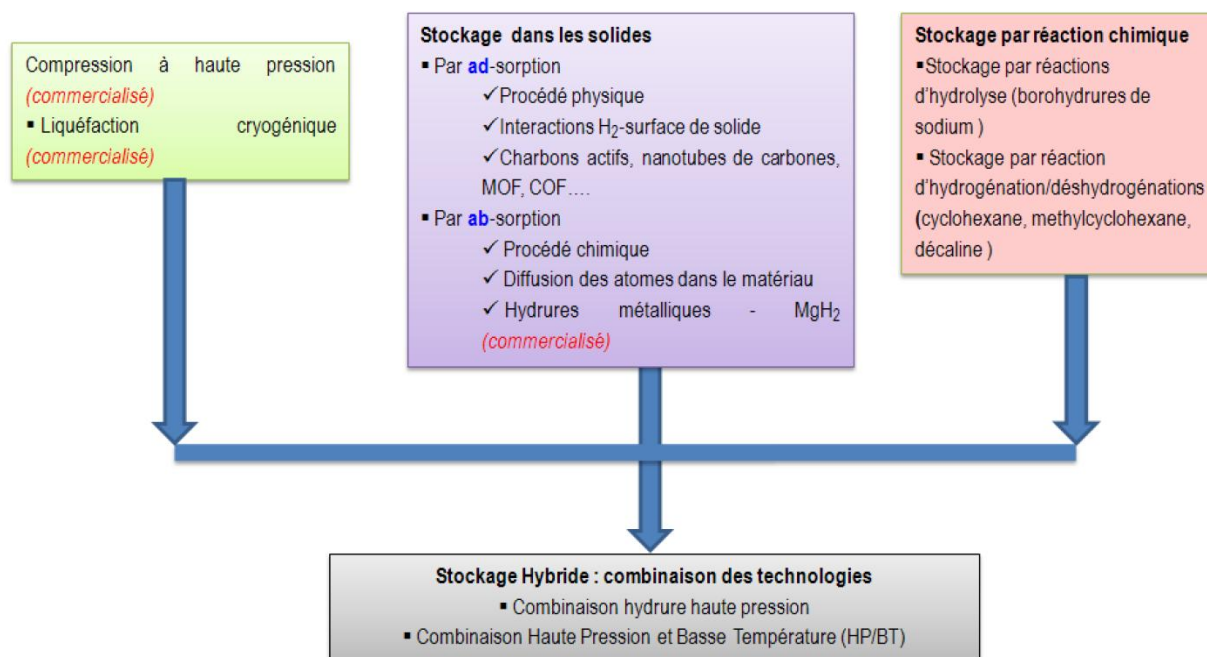


Figure 13 : Techniques de stockage de l'hydrogène³⁴

Les techniques de stockage actuellement associées aux électrolyseurs sont principalement les techniques de stockage par compression ainsi que les techniques d'absorption par hydrures. Le stockage sous forme de liquide cryogénique n'est pas utilisé du fait de sa forte consommation énergétique. Le stockage par voie chimique n'est pas encore à un stade de maturité industrielle. Seules les technologies de stockage sous pression et dans les hydrures sont décrites ci-dessous.

2.3.1 STOCKAGE D'HYDROGENE PAR COMPRESSION EN RESERVOIR/ BOUTEILLE

Le stockage d'hydrogène par compression est la méthode la plus simple et la plus mature parmi les technologies disponibles. Le stockage par compression consiste à stocker l'hydrogène sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs. Ces réservoirs, souvent cylindriques, sont conçus avec des matériaux qui permettent de garder l'hydrogène à haute pression. Une masse de 1 kg d'hydrogène occupe un volume de 11 m³ dans les conditions de température et pression ambiantes. Pour augmenter la densité d'hydrogène dans un système de stockage, il est nécessaire de produire un travail de compression.

³⁴ DRA-13-125497-00405A- Veille technologique et évaluation des risques sur les procédés de stockage d'hydrogène -25/06/13 - T JAYBALAN

Il existe 4 types de réservoirs (cf. Figure 14) :

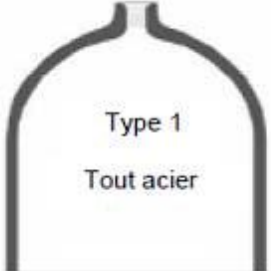





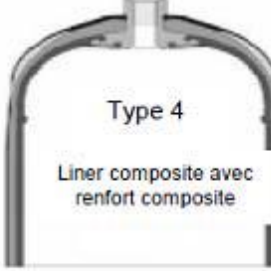

| | | |
|--|--|---|
|  <p>Type 1 Tout acier</p> |  <p>Réservoir tout</p> | <p>Type I : Ils sont entièrement métalliques, le métal assurant la structuration et l'étanchéité du réservoir. Les pressions maximales ne dépassent généralement pas 250 bar pour des applications mobiles et peut atteindre des pressions supérieures sur des stockages stationnaires.</p> |
|  <p>Type 2 Acier avec renfort composite circonférentiel</p> |  <p>Liner métallique Bobinage composite « hoop Wrap »</p> | <p>Type II : Ce type de réservoir est fabriqué en métal entouré par un cylindre de filament autour de la virole de l'enveloppe métallique. Les réservoirs construits en métal-fibre permettent un stockage d'hydrogène jusqu'à une pression de 850 bar.</p> |
|  <p>Type 3 Liner acier avec renfort composite complet</p> |  <p>Liner métallique Bobinage « fully Wrap »</p> | <p>Type III : Le réservoir de type III est composé de matériaux composites entourant un liner (enveloppe interne) en métal. Les composites sont généralement basés sur des fibres d'aramide ou de verre. Des pressions de l'ordre de 350 bar sont couramment atteintes. Des réservoirs de type III à 700 bar existent en fibre de carbone. Ceux-ci présentent cependant encore parfois une tenue au cyclage de pression insuffisante, ce qui peut être un obstacle à leur homologation pour utilisation dans les véhicules³⁵.</p> |
|  <p>Type 4 Liner composite avec renfort composite</p> |  <p>Liner plastique Bobinage « fully Wrap »</p> | <p>Type IV : Le réservoir de type IV est fabriqué sur un bobinage tournant avec des matériaux composites comme la fibre de carbone sur un liner aussi en polymère (polyéthylène, polyamide). Le liner est en général produit par injection-soufflage ou par roto-moulage. Ce type de réservoir peut stocker l'hydrogène jusqu'à une pression de 1000 bar.</p> |

Figure 14 : Evolution des réservoirs de stockage d'hydrogène par compression³⁶

Les volumes d'hydrogène stockés en aval des électrolyseurs varient en fonction des besoins des industriels et des capacités de production des électrolyseurs.

³⁵ Homologation au titre du RÈGLEMENT (CE) no 79/2009 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 14 janvier 2009 concernant la réception par type des véhicules à moteur fonctionnant à l'hydrogène et modifiant la directive 2007/46/CE

³⁶ Site internet : LUXFER '<https://www.luxfer.com/>

Il ressort d'une étude menée auprès des industriels (cf. partie 1.1 pour le détail de l'étude) que :

- les stockages excèdent rarement 100 kg et sont ainsi rarement soumis au régime des installations classées (rubrique 4715) ;
- les pressions de stockages sont en majorité de 200 bar ;
- pour les stations-service, les pressions pour les stockages tampon montent à 450 et 1100 bar pour alimenter les véhicules à 350 et 700 bar respectivement ;
- les réservoirs de type III et IV sont notamment utilisés pour les stockages embarqués dans des véhicules.

Noter que des stockages tampons peuvent exister sur les sites en parallèle de l'électrolyseur (pour « assurer » l'alimentation en H₂).

2.3.2 STOCKAGE SOLIDE

Le stockage d'hydrogène dans les solides est une méthode en plein développement. Elle permet de stocker une grande quantité d'hydrogène dans un volume optimal à une température et une pression raisonnables.

Il existe trois grandes voies de stockage dans les solides correspondant à la mise en œuvre de trois types de phénomènes physico-chimiques différents : l'absorption, l'adsorption et la réaction chimique.

Les conditions de stockage de l'hydrogène en pression et la température varient en fonction du phénomène de stockage et du type de solide utilisé. Le choix d'un adsorbant/absorbant plus adapté au stockage d'hydrogène est donc étroitement lié aux propriétés physico-chimiques et aux conditions opératoires envisagées pour effectuer le stockage.

Parmi les technologies de stockage d'hydrogène dans le solide, la technique de stockage par absorption dans les métaux comme le Magnésium est commercialisée pour le stockage stationnaire. Les autres techniques sont encore au stade soit de recherche, soit de développement pré industriel.

Le stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques

L'hydrogène forme des hydrures avec certains métaux et alliages métalliques ; les conditions de formation des hydrures sont modérées en termes de pression et température. Ces conditions d'opération fournissent un avantage de sécurité et de simplicité sur celles requises pour les procédés de compression et de liquéfaction.

2.3.3 SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTES FORMES DE STOCKAGES

Les techniques de stockage utilisables pour l'hydrogène sont diverses : le stockage sous forme de gaz comprimé ou de liquide cryogénique ; le stockage dans les solides, l'hydrogène étant alors absorbé ou adsorbé par un solide et le stockage par réaction chimique.

Le choix du mode de stockage d'hydrogène est ouvert et doit faire l'objet d'une réflexion au cas par cas car les différentes technologies de stockage d'hydrogène présentent chacune des avantages et des inconvénients. Les progrès en termes de coût de technologie, de capacité, de masse des réservoirs et de sécurité sont des points clés.

| | |
|------------------------------------|---|
| Stockage sous forme liquide | Le stockage sous forme liquide, fait appel à une technologie complexe et requiert une énergie importante pour liquéfier l'hydrogène. Il est donc réservé à des applications spécifiques et pour des applications utilisant des quantités importantes d'hydrogène. Il n'est actuellement pas associé à des installations d'électrolyses. |
| Stockage sous forme gazeux | <p><u>Stockage en cavité</u></p> <p>Des quantités très importantes peuvent être stockées dans des cavités salines. Elles seront dans ce cas associées à un réseau de distribution (cf. partie 2.4)</p> <p>Dans l'état actuel de développement des électrolyseurs, ce type de stockage n'est pas adapté mais pourrait se développer avec des installations de grande capacité.</p> |
| | <p><u>Stockage sous pression</u></p> <p>Le stockage d'hydrogène sous pression est une technologie relativement simple d'un point de vue de sa mise en œuvre, mais s'avère assez coûteuse pour la compression.</p> |
| Stockage sous forme solide | Le stockage de l'hydrogène dans les solides présente un certain potentiel de développement, notamment dans le cas du stockage sous forme d'hydrures métalliques. Cette technologie permet d'atteindre de bons rapports entre la quantité stockée et le volume et opère à des niveaux de pression relativement faibles. Néanmoins, le poids du réservoir par rapport à la masse d'hydrogène stockée est élevé et handicape fortement cette technologie pour les applications mobiles. De plus, les coûts des matériaux sont encore assez élevés. De nombreuses recherches sont encore en cours à ce sujet. |

2.4 RACCORDEMENT A UN RESEAU DE DISTRIBUTION

L'hydrogène est un moyen de stocker de l'électricité renouvelable intermittente : le principe est d'utiliser l'électricité excédentaire en heures creuses pour produire de l'hydrogène et l'envoyer vers un réseau de distribution.

L'hydrogène est ensuite soit stocké dans des réservoirs tels que décrits précédemment pour utilisations ultérieures (stations-service, injection dans le réseau...), soit envoyé directement dans un réseau de distribution de gaz.

L'injection peut se faire dans deux types de réseaux :

- soit injection dans le réseau de gaz naturel, ce qui constitue des quantités importantes d'énergie compte-tenu du volume du réseau de gaz naturel en France et en Europe ;
- soit injection dans un réseau local de distribution d'hydrogène.

2.5 DEVENIR DE L'OXYGENE

Les divers industriels interrogés dans cet étude (cf. partie 1.1 pour le détail) considèrent que la valorisation de l'oxygène est difficile (actuellement l'oxygène produit par électrolyse est rejeté par un évènement), même si quelques applications peuvent être considérées :

- injection de l'oxygène dans l'eau pour limiter les perturbations du milieu biologique liées par exemple à un barrage ;
- production d'oxygène haute pression pour des applications en milieu anaérobie telles que sous-marines³⁷ ;
- pour le secours électrique, injection dans une pile à combustibles ;
- technologie de soudage particulier où la flamme est obtenue avec l'hydrogène et l'oxygène³⁸ ;
- utilisation dans le secteur médical.



Figure 15 : Barrage de Port-Mort : injection d'oxygène dans l'eau du barrage³⁹



Figure 16 : Utilisation de l'oxygène dans les sous-marins⁴⁰

La valorisation par circuit de distribution classique est difficile car, actuellement, l'oxygène se transporte principalement sous forme liquéfiée par camion. Ajouter une étape de liquéfaction de l'oxygène produit localement par électrolyse renchérit fortement la solution. La valorisation n'est donc possible que localement et par utilisation directe.

³⁷ Article : Proton OnSite va fournir des stacks d'électrolyse à plusieurs flottes de sous-marins du 11 mars 2015

³⁸ www.youtube.com: Vidéo : un nouveau procédé pour faire du feu avec de l'eau - futuris

³⁹ Article : Port-Mort : La société WH2 va produire de l'hydrogène vert- 18/02/2015

⁴⁰ Water Electrolysis and renewable Energy Systems- Fuelle Cell Today- Mars 2013

2.6 MARCHE DES ELECTROLYSEURS

L'hydrogène est utilisé depuis des années dans de nombreux secteurs industriels (chimie, agroalimentaire, transformation du verre, sidérurgie, microélectronique). L'électrolyse permet la production locale d'hydrogène pour des utilisations spécifiques, par exemple pour la production d'hydrogène décarboné ou d'hydrogène très pure.

Mais l'électrolyse est également un procédé présentant l'avantage de pouvoir assurer le stockage des énergies électriques renouvelables intermittentes. Elle est donc amenée à se développer en parallèle au développement des énergies renouvelables. L'objectif de l'électrolyseur est alors plus le lissage de la production d'énergie que la production d'hydrogène.

Selon l'AFHYPAC, l'électrolyseur peut aussi trouver un marché dans le secteur de la production et l'alimentation d'hydrogène dans des stations-service pour véhicules à hydrogène.

2.6.1 APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DE L'INDUSTRIE

Dans les pays où existe un réseau d'approvisionnement d'hydrogène largement développé (Etats-Unis, Japon, Europe...), l'électrolyse est difficilement compétitive par rapport à d'autres procédés tels que le reformage du gaz naturel.

Dans les pays qui ont des difficultés d'approvisionnement (Russie, Asie, Moyen Orient, Afrique...), l'électrolyse est un procédé intéressant si la garantie de disponibilité permanente est importante.

Dans les domaines des faibles débits de production (jusqu'à quelques centaines de litres par heure), les applications sont très variées.

Elles concernent par exemple :

| | |
|---------------------|---|
| <i>Laboratoire</i> | la production de gaz purs (chimie de synthèse...) |
| <i>Bijouterie</i> | l'alimentation des chalumeaux (postes à souder) |
| <i>Météorologie</i> | le gonflage de ballons météorologiques. |

Tableau 8 : Exemple d'applications pour des débits faibles⁴¹

⁴¹ Site Internet : www.mcphy.com/

AREVA H2Gen : La production d'hydrogène par électrolyse- F.Auprêtre- Décembre 2014

Il existe de nombreux autres domaines d'applications avec des débits plus importants, par exemple :

| | |
|---------------------|---|
| <i>Energie</i> | Refroidissement des turbines de générateur électrique |
| <i>Alimentaire</i> | Fabrication d'huiles végétales hydrogénée comme la margarine ou le beurre |
| <i>Verre</i> | Production de fibres optiques Production du verre plat |
| <i>Métallurgie</i> | Traitement thermique des métaux Découpe / Soudure / Brasage Frittage |
| <i>Electronique</i> | Fabrications des dispositifs semi-conducteurs Fusion renforcement du quartz |
| <i>Chimie</i> | Matière de base pour la production d'ammoniac et de méthanol |
| <i>Raffinage</i> | Principale utilisation de l'hydrogène : l'élimination du soufre contenu dans les carburants |

Tableau 9 : Exemple d'applications pour des débits industriels⁴¹

2.6.2 APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DE LA MOBILITE

La mobilité hydrogène concerne principalement les véhicules électriques dans lesquels une pile à combustible alimentée en hydrogène génère une puissance électrique pour faire avancer le véhicule. Des stations-service sont nécessaires afin d'alimenter ces véhicules.

La station-service d'hydrogène a plusieurs modes d'approvisionnement en hydrogène :

Production sur place

- la production sur place grâce à une électrolyse,
- la production sur place grâce à du vaporeformage.

Livraison

- la livraison sous forme liquide,
- la livraison sous forme gazeuse,
- l'approvisionnement par pipelines.

Deux principaux procédés ont été appliqués pour approvisionner en hydrogène les stations services sur place : le vaporeformage du gaz naturel (avec la problématique des émissions CO₂ et NO_x sur place) et l'électrolyse de l'eau. Si l'hydrogène est généré sur place, il sera transféré à partir du reformeur ou électrolyseur au moyen d'un compresseur à un réservoir de stockage sous pression.

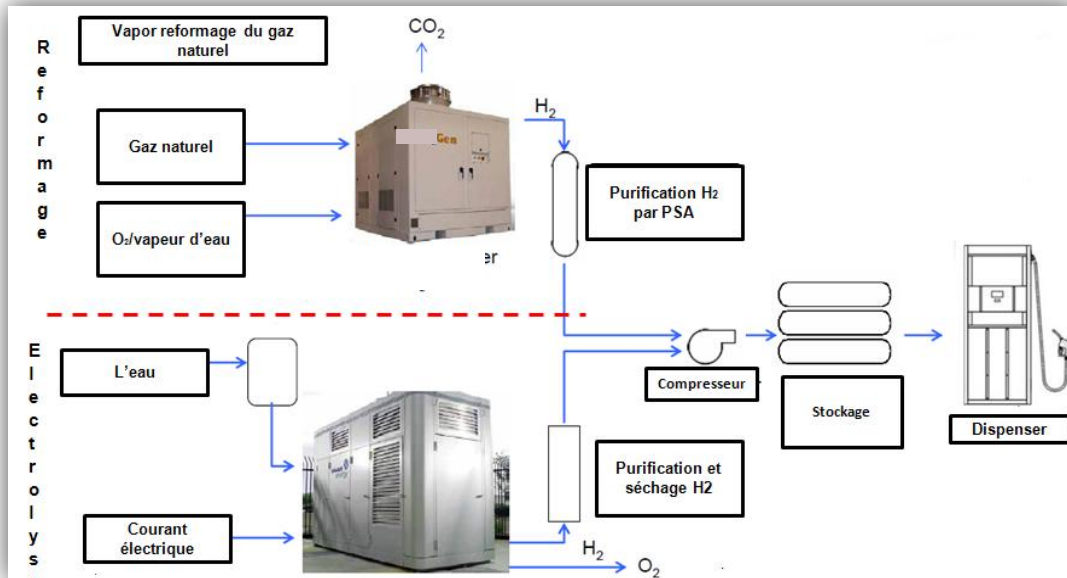


Tableau 10: Configuration possible d'une station-service avec production d'hydrogène sur place⁴²

En mars 2013, plus de 300 stations-service à hydrogène étaient recensées dans le monde. Elles sont publiques ou privées et sont implantées à titre de démonstrateurs, en déploiement pré-commercial et pour la recherche et le développement. Elles sont spécifiques à la distribution d'hydrogène ou peuvent être multi carburants (cf. la station Shell à Hambourg⁴³). Ces stations fournissent l'hydrogène pour les voitures et les flottes de bus. Les Etats Unis, l'Allemagne et le Japon sont des pays qui ont mis en place le plus de stations-service d'hydrogène et sont fortement impliqués dans la construction future de nouvelles stations-service.

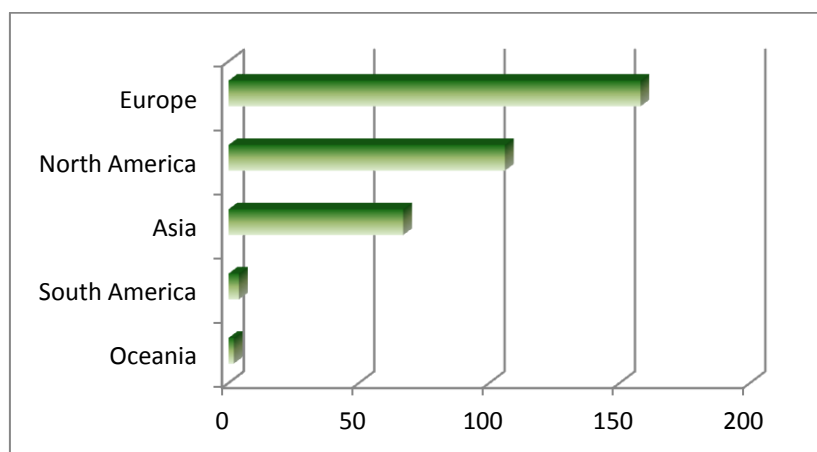


Figure 17 : Répartition des stations-service d'hydrogène par continent (Mars 2015)⁴⁴

⁴² DRA-14-133553-00739A- Analyse de risque des stations de recharge (stations service) selon les différents types d'approvisionnement- T. JAYABALAN

⁴³ Voir sur le site www.youtube.com la video sur la construction de la station-service : See what it takes to build a new hydrogen fuelling station

⁴⁴ Analyse statistique basée sur le site www.netinform.net

2.6.3 APPLICATION DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE

Power-to-gas

La transformation de l'électricité en gaz injecté ensuite dans les réseaux permettrait de valoriser des excédents d'électricité. Le concept est aussi appelé **Power-to-Gas**.

L'intégration massive de sources d'énergie renouvelable fluctuante (éolien, photovoltaïque principalement) dans les systèmes de production électrique implique des périodes de plus en plus importantes durant lesquelles la production dépassera la demande ou l'inverse. Les quantités mises en jeu pourront dépasser les capacités classiques de flexibilité et de stockage du système électrique : la conversion en un autre vecteur énergétique apparaît donc comme une solution pour valoriser ces excédents.

Le gaz produit peut être valorisé de plusieurs manières sur place : par un industriel pour ses propres besoins de procédé (cf. partie 2.6.1) ou par une station-service de remplissage de véhicules (cf. partie 2.6.2), ou encore être localement stocké pour être reconvertie ultérieurement en électricité *via* une pile à combustible comme cela est fait sur les sites isolés.

Mais il peut aussi être injecté directement dans les réseaux de distribution ou de transport de gaz naturel (cf. partie 2.4) comme le projet du groupe Thüga d'injection d'hydrogène dans le réseau de distribution de Francfort ou le projet GRHYD à Dunkerque.

2.6.4 ELECTROLYSEUR : QUELS MARCHES ? QUELLE EVOLUTION ?

L'hydrogène est présent dans des secteurs variés à des stades de maturité plus ou moins avancés (cf. Tableau 11).










| Applications | Industrie | | Mobilité | | Stockage électrique | |
|--|--|---|---|--|---|---|
| |  | |  | |  | |
| Maturité du marché | Mature  | | En développement  | | Introduction  | |
| Croissance sous jacente du marché | Marché stable |  | Sortie des véhicules électriques alimentés par PAC |  | Augmentation avec les énergies fatales |  |
| Frein et atout des électrolyseurs | Prix de l'hydrogène produit par électrolyse (aujourd'hui) non concurrentiel pour les débits importants | | Partage de la production d'hydrogène entre le reformage et l'électrolyse | | Possibilité de l'électrolyse de convertir l'électricité en hydrogène ou méthane | |

Tableau 11 : Principaux marchés de l'hydrogène électrolytique et maturité

Les marchés liés aux nouvelles utilisations de l'hydrogène pour la mobilité et pour le stockage sont des marchés en devenir, offrant un fort potentiel de croissance. Toutefois, une estimation de l'évolution des capacités moyennes des électrolyseurs pour répondre à ces marchés (réalisée par la société Areva H2Gen) montre qu'il est nécessaire de proposer des électrolyseurs de plus forte capacité.

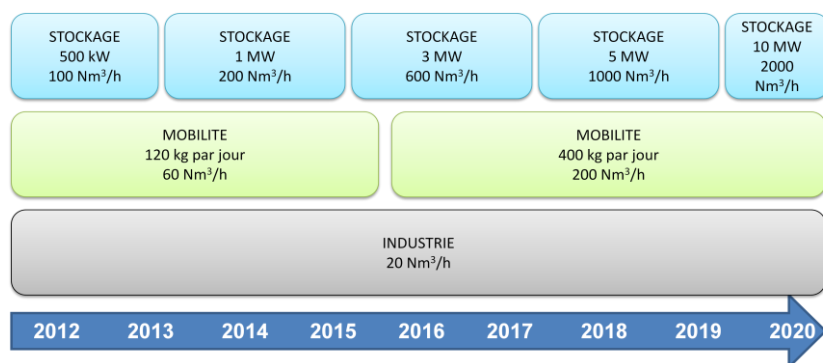


Tableau 12 : Estimation de l'évolution des capacités moyennes des électrolyseurs pour répondre aux trois marchés visés⁴⁵

Afin d'être en mesure de s'adresser à ces nouveaux marchés, les efforts en R&D des industriels doivent porter sur deux principaux axes, à savoir :

- l'accroissement de la capacité de production des électrolyseurs,
- l'abaissement du prix des installations,
- l'accroissement des performances et de la durabilité.

⁴⁵ Le Stockage d'énergie –Chakib Bouallou - Presses des Mines, ISBN : 978-2-35671-204-2, (2015)

3. RETOUR D'EXPERIENCE ET SCENARIOS D'ACCIDENTS POSSIBLES

Cette partie est consacrée à l'analyse des risques des différents procédés d'électrolyse et de stockage d'hydrogène commercialisés. Cette évaluation des risques est, par nature, générique et fournit donc une liste de scénarios ou de situations de dangers qui devra être adaptée au cas par cas pour chaque installation afin de définir de façon précise les mesures de maîtrise des risques à mettre en place.

3.1 IDENTIFICATION DES RISQUES

3.1.1 ANALYSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

Les étapes de procédé considérées sont :

- la production d'hydrogène par électrolyse alcaline ou PEM ou SOEC,
- la compression et échangeur d'hydrogène en sortie d'électrolyseur,
- le transfert d'hydrogène comprimé dans les tuyauteries,
- le stockage d'hydrogène sous pression ou sous forme d'hydrures.

Nous n'avons pas identifié à l'échelle internationale ou nationale de base de données recensant l'accidentologie relative à l'hydrogène énergie de façon exclusive et exhaustive. Afin de réaliser les analyses de risques, l'INERIS a utilisé les données publiquement accessibles dans les bases des données suivantes :

- Hydrogen Lessons Learned : base de données opérée par le U.S. Department of Energy. Site web : <http://h2tools.org/lessons/> ;
- The Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD) ; base de données supportée par le Joint Research Centre Institute for Energy and Transport. Site web : <https://odin.jrc.ec.europa.eu/engineering-databases.jsp> ;
- ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) ; base de données supportée par la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère du développement durable. Site web : <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/rechercher-un-accident/> ;
- le projet **BASHYC** (Base de connaissance sur l'accidentologie Hydrogène) : il s'agit d'une étude réalisée pour le compte de l'ADEME par ALPHEA Hydrogène.

Ce retour d'expérience a été complété par des données issues d'un questionnaire posé directement aux fournisseurs et/ou fabricants d'installation (cf. présentation de l'étude dans la partie 1.1 du présent rapport).

Une analyse des retours d'expérience sur l'accidentologie des installations industrielles manipulant ces technologies a été effectuée. Un tableau récapitulatif des accidents identifiés et utilisés pour cette analyse des retours d'expérience est disponible en annexe 1 de ce document.

L'industrie de l'hydrogène étant principalement liée à la production de gaz de synthèse pour la production de l'ammoniac et du chlore, les retours d'expérience disponibles et applicables à l'hydrogène pur (donc l'hydrogène énergie) sont peu nombreux. Au total, 32 accidents ont été identifiés comme applicables aux cas d'études et reportés dans le tableau récapitulatif. Malgré le faible nombre de retours d'expérience exploitables, il est possible de tirer des premières conclusions et enseignements pour chacune des étapes mises en œuvre dans les cas d'étude.

3.1.1.1 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU

Cinq retours d'expériences ont été recensés concernant les électrolyseurs dont quatre concernent la technologie alcaline. Quatre ont été fournis par les fabricants et un provient des bases de données.

3.1.1.1.1 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ELECTROLYSEURS ALCALINS

Les principaux phénomènes dangereux rencontrés sont : le rejet de matière dangereuse (inflammable ou toxique), les incendies et les explosions.

Au niveau des électrolyseurs, l'élément du procédé le plus sensible est la membrane du stack (4 incidents sur 5 enregistrés) qui présente le risque principal d'explosion suite à un mélange hydrogène / oxygène par rupture ou perte d'étanchéité de celle-ci.

Les causes principalement identifiées sont :

- des défauts de matériels tels que la défaillance des systèmes de mesures (pression, analyseur O2...) ou un défaut d'étanchéité au niveau de la membrane ou des problèmes de corrosion (présence de produit corrosif KOH) ou fragilisation ;
- la perte de maîtrise du procédé liée par exemple à l'obstruction des tuyauteries d'alimentation qui conduit à un faible niveau d'électrolyte et à un fort taux d'oxygène dans le réservoir d'hydrogène.

3.1.1.1.2 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ELECTROLYSEURS PEM

Les électrolyseurs PEM ont été mis récemment sur le marché et peu, voire pas d'incident sont actuellement recensés sur ce type de technologie.

Des problématiques sont apparues concernant :

- les électrolyseurs ayant des puissances élevées,

Les fabricants ont relevé des difficultés spécifiques aux électrolyseurs ayant des puissances élevées (notamment pour le développement d'installations pilotes de l'ordre du mégawatt) couplés avec des énergies renouvelables avec notamment une durée de vie des membranes faible et l'apparition de fuite au niveau des stacks.

- les électrolyseurs ayant des pressions élevées.

Une étude⁴⁶ 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. Au delà des risques dus à l'opération d'un système à haute pression jusqu'à 130 bar, 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 la section hydrogène de l'électrolyseur ou à l'inverse, à la présence d'hydrogène dans la section oxygène de l'électrolyseur.

Pour maîtriser ces risques, plusieurs solutions peuvent être apportées :

- le développement de membranes moins favorables à ce phénomène de perméation inverse, soit par une plus grande épaisseur, soit par l'utilisation d'autres matériaux tels que des composites dont la résistance à la perméation inverse sera augmentée ;
- la mise en place d'une maintenance accrue au niveau des membranes⁴⁷ ;
- l'utilisation de recombineurs catalytiques pour contrôler la concentration d'oxygène et d'hydrogène dans chacune des deux sections de l'électrolyseur.

3.1.1.1.3 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ELECTROLYSEURS SOEC

Du fait de l'évolution technologique récente des électrolyseurs SOEC et l'absence d'installations industrielles, aucun retour d'expérience n'a été identifié dans les bases de données d'accidentologie.

Dans la littérature, un point faible du SOEC qui ressort dans les études est la dégradation des stacks. La cause de cette dégradation est l'augmentation de la résistance avec le temps qui provient de la dégradation des interfaces et de la « déstabilisation » du matériel (couches successives électrolyte, électrode,...). Des travaux de recherche sont effectués pour développer des matériaux dans le but d'améliorer leur stabilité.⁴⁸

Les fabricants ont également mentionné les précautions à prendre au niveau de l'alimentation en vapeur afin notamment de s'assurer que l'eau est déminéralisée pour éviter la formation de dépôt.

Au niveau du stack, il ressort qu'une attention doit être portée :

- aux différentiels de température,
- aux débits de gaz d'alimentation,
- à l'étanchéité entre les deux compartiments.

⁴⁶ *High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues*, 2010, Grigoriev et al, International Journal of Hydrogen Energy, volume 36, pages 2721-2728

⁴⁷ *Five considerations for large-scale hydrogen electrolyzer development*, by M Schillet and Everett Anderson- Protononsite- Issue 1/2014- Gas to Energy p.44-47

⁴⁸ RelHy final Report ;

Source : https://setis.ec.europa.eu/energyresearch/sites/default/files/project/docs/RelHy%20final%20report_1.pdf

3.1.1.2 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES INSTALLATIONS AUTOUR DES ELECTROLYSEURS

3.1.1.2.1 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA COMPRESSION DE L'HYDROGENE

Pour la compression, il a été choisi de se concentrer sur l'accidentologie de la compression de l'hydrogène en ne se focalisant pas uniquement sur les installations d'électrolyse.

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 sont dus 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 la raison est une succession d'évènements 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.

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

3.1.1.2.2 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE TRANSFERT D'HYDROGENE

Douze accidents ont été identifiés sur le transfert d'hydrogène en tuyauterie. Ils ont tous conduit à la libération d'hydrogène dans l'environnement.

Parmi ces accidents, un seul est dû à de la corrosion. En revanche cet accident a eu des conséquences majeures car la canalisation était enterrée et l'hydrogène libéré s'est accumulé jusqu'à produire une explosion.

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 tuyauterie (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 ou une erreur de choix de matériel lors de la conception de l'installation.

3.1.1.2.3 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ECHANGEURS

Huit accidents ont été identifiés sur les échangeurs. Ils sont tous liés à la libération de gaz dans l'environnement ambiant.

Parmi ces accidents, les défaillances humaines ressortent avec 50% des accidents recensés. Il s'agit d'erreurs d'assemblage qui entraînent des fuites de gaz lors du démarrage de l'installation. Les phases de montage et démontage sont ainsi des phases qu'il est important d'encadrer avec des procédures et la formation du personnel de maintenance.

Les autres accidents identifiés sont liés à des défaillances techniques dues à l'attaque de l'hydrogène à haute température, la corrosion ou à un choix de matériaux inadaptés.

3.1.1.3 RETOURS D'EXPERIENCE SUR LE STOCKAGE D'HYDROGENE

3.1.1.3.1 STOCKAGE EN RESERVOIR SOUS PRESSION GAZ

Huit accidents ont été identifiés sur le stockage d'hydrogène sous pression dont six dûs à une fuite d'hydrogène vers l'air ambiant, un dû à un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans le système et un dû à une surpression dans le système.

Les accidents liés à une fuite d'hydrogène vers l'air ambiant ont pour origine des causes variées et non spécifiques à la problématique du 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.

Il est probable que la plupart des accidents identifiés aurait pu être prévenue par l'application de procédures plus strictes en matière de révision des équipements et de consignes de sécurité aux opérateurs.

3.1.1.3.2 STOCKAGE SOUS FORME D'HYDRURES

Dans la littérature et les différentes bases de données, aucun accident n'a été identifié sur une installation comprenant un stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures. Cependant un accident avec l'explosion et le feu lors de la production des galettes d'hydrures a été identifié. Le potentiel de danger est lié à la pyrophoricité des hydrures pulvérulents quand ils rentrent en contact avec l'air.

Sur site, les fabricants ont signalé 2 fuites au niveau des réservoirs d'hydrure sans conséquence matérielle et humaine. Les incidents sont dûs à un défaut d'étanchéité au niveau du manomètre de la bouteille et une utilisation inadaptée de l'utilisateur. Ces incidents pourraient être prévenus en formant le personnel et en vérifiant l'étanchéité avant utilisation.

3.1.1.4 SYNTHESE DES ENSEIGNEMENTS DE L'ACCIDENTOLOGIE

Le retour d'expériences sur les électrolyseurs a permis d'identifier les parties de l'installation à surveiller telles que l'alimentation des électrolyseurs, le séparateur et la membrane des stacks. Au niveau de l'électrolyseur SOEC, la littérature a souligné également que la dégradation des stacks pourrait être problématique.

Selon les données disponibles, la corrosion, la fatigue mécanique et la défaillance de pièces isolées sont régulièrement responsables d'accidents. Ces phénomènes peuvent être anticipés et maîtrisés par des standards de design et par des procédures plus strictes de maintenance préventive des équipements.

Actuellement, les installations d'électrolyse et stockage sont placées de plus en plus près de personnel qui n'est pas habitué à manipuler des installations de gaz. Les fabricants ont relevé des incidents tel que des micro-fuites sur des réservoirs d'hydrures ou le déclenchement intempestif d'alarmes au niveau de compresseur qui sont liés à la méconnaissance et l'utilisation erronée du matériel. Ces phénomènes sont actuellement maîtrisés par :

- une sensibilisation, information et formation accrue des utilisateurs ;
- une maintenance et un suivi augmentés après le démarrage de l'installation.

Au niveau de la maintenance, les défauts de montage sont également des points à surveiller principalement lors d'opérations de maintenance et de redémarrage d'installations. Les interventions doivent ainsi être anticipées par la rédaction de procédure détaillée et la formation au préalable du personnel de maintenance.

3.1.2 EVENEMENTS REDOUTES IDENTIFIES

Des analyses de risques ont été réalisées par l'INERIS :

- avec l'ADEME et les industriels français concernant des électrolyseurs alcalins et PEM et les différents types de stockage ;
- dans le projet ANR DEMETER concernant les électrolyseurs SOEC.

Trois grands types d'événements redoutés se dégagent de ces analyses de risques :

- la perte de confinement ;
- les mélanges d'hydrogène/oxygène ou hydrogène/ air dans l'électrolyseur ;
- la réaction des hydrures avec l'air ou l'humidité.

3.1.2.1 PERTE DE CONFINEMENT

La perte de confinement peut être due :

- à la corrosion ou fragilisation d'origine aux gaz ou attaque des hydroxydes de potassium ou sodium ;
- aux contraintes de température et pression exercées sur les matériaux ;
- à des erreurs de montages ;
- à des agressions mécaniques ou thermiques (effet domino) ;
- à des vibrations, fatigue et vieillissement ;
- au choix de matériaux inadaptés (par exemple la fragilisation par l'hydrogène).

La corrosion ou la fragilisation ou l'attaque des métaux et les défauts de montage sont une des principales causes de perte de confinement sur les installations contenant de l'hydrogène. C'est pourquoi il est utile de rappeler les propriétés des produits présents.

Les fuites sont facilitées par la taille de la molécule d'hydrogène. La corrosion et la fragilisation sont aussi liées aux propriétés de perméation de l'hydrogène dans certains matériaux et la réaction avec ceux-ci conduit à leur fragilisation.

Enfin, les hydroxydes employés dans les électrolytes alcalins sont aussi corrosifs et attaquent certains métaux (par exemple l'aluminium, le zinc, l'étain, le plomb).

3.1.2.2 MELANGES HYDROGENE /AIR

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

- l'introduction d'air dans des volumes remplis d'hydrogène après une opération de maintenance et l'oubli d'inertage lors du démarrage de l'installation ;
- l'infiltration d'air à l'aspiration du compresseur par défaut d'alimentation en hydrogène.

L'alimentation des compresseurs est une phase critique qui présente des risques d'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 sans alimentation, un vide se crée et de l'air peut s'infiltrer de l'extérieur.

3.1.2.3 MELANGE H₂/O₂

Le mélange H₂/O₂ désigne ici la mise en contact des gaz H₂ et O₂ purs.

Le mélange H₂/O₂ peut principalement avoir lieu sur des équipements tels que les séparateurs ou l'électrolyseur (membrane). Des équipements peuvent également être à surveiller :

- les tuyauteries communes aux 2 séparateurs,
- les échangeurs avec un circuit de refroidissement commun.

Le mélange H₂/O₂ résulte en général d'un défaut d'étanchéité ou d'un défaut d'approvisionnement en eau ou gaz neutre du système.

3.1.2.4 REACTIVITE DES HYDRURES

La réactivité des hydrures peut se manifester sous forme de réaction exothermique non souhaitée et non maîtrisée résultant en général de l'arrivée d'impuretés dans le gaz d'approvisionnement ou d'un défaut du système de chauffage ou de refroidissement. Le changement de structure des galettes dû au cyclage successif et les surpressions sont des phénomènes à prendre en compte.

Défaut du système de chauffage

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 au cours de la phase de déstockage, la réaction de désorption s'interrompt automatiquement avec la baisse de température et pression au sein du réservoir. Cette baisse de température peut créer un vide dans le réservoir et de l'air ambiant peut alors s'y infiltrer si le réservoir n'est pas étanche au vide. Ce point est important à prendre en compte lors du choix du système de protection contre les surpressions.

Arrivée d'impuretés dans le gaz d'approvisionnement

Les hydrures peuvent être exposés à l'eau ou à des impuretés si l'unité de séchage d'hydrogène en sortie d'électrolyse est défaillante ou si les filtres sont inefficaces ou inadaptés.

Changement de structure des galettes due au cyclage successif

Le phénomène cyclique d'absorption et 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 rupture mécanique du réservoir conduirait automatiquement à exposer les hydrures à l'air ambiant et à son humidité.

Effet de surpression

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.

3.2 CARACTERISTIQUES DES SCENARIOS ACCIDENTELS

Les phénomènes dangereux potentiellement envisageables sont :

- l'explosion d'un nuage d'hydrogène (VCE ou UVCE),
- l'explosion hybride de poudre métallique,
- le jet enflammé d'hydrogène (effets thermiques),
- la combustion des hydrures (effets thermiques),
- l'éclatement de réservoirs auquel sont associés des effets de pression et de projection,
- l'anoxie consécutive à un rejet d'argon / azote,
- la suroxygénation ou le feu, consécutif à un rejet d'oxygène,
- l'emballement thermique lié au mélange d'un hydroxyde de sodium ou potassium avec l'eau.

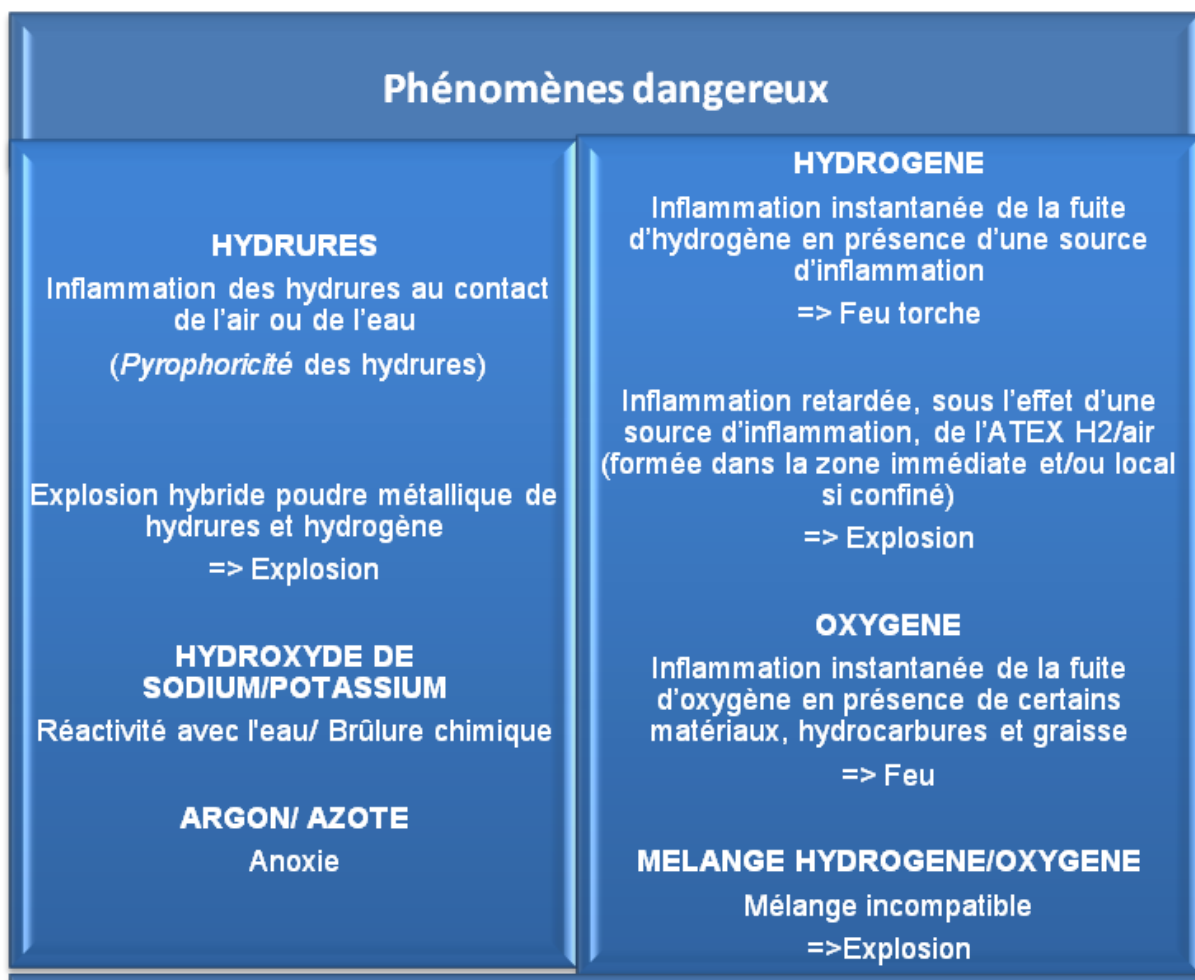


Figure 18 : Schéma reprenant les principaux phénomènes dangereux liés aux électrolyseurs et installations de stockages

3.3 MESURES DE MAITRISE DES RISQUES

Il a été décidé de présenter quelques mesures de maîtrise des risques en s'inspirant de la structure de deux arrêtés types :

- Arrêté du 12/02/98 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 1416 : " Stockage ou emploi de l'hydrogène ».
- Projet d'Arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux installations mettant en œuvre l'hydrogène gazeux dans une installation classée pour la protection de l'environnement pour alimenter des chariots à hydrogène gazeux lorsque la quantité d'hydrogène présente au sein de l'établissement relève du régime de la déclaration pour la rubrique n°4715.

Les mesures de maîtrise des risques citées sont une synthèse non exhaustive des barrières de sécurité. Elles proviennent :

- des normes telles que l'ISO 22734 spécifiques aux électrolyseurs ou l'ISO 16111 spécifique aux hydrures,
- des études réalisées avec l'ADEME et dans le cadre du projet DEMETER,
- des entretiens avec les industriels.

La liste de ces mesures pourra être actualisée dans le cadre d'une étude plus complète des textes réglementaires et/ou normes.

3.3.1 MESURES CONCERNANT L'IMPLANTATION ET L'AMENAGEMENT

Les analyses des risques réalisées par l'INERIS⁴⁹ ont conduit à recommander de placer, dans la mesure du possible, les systèmes sous pression à l'air libre dans des zones non confinées (notamment les stockages).

Règles d'implantation

ISO/WDTR 19880-1

Concernant les distances de sécurité, une réflexion est actuellement menée dans la rédaction de l'ISO/WDTR 19880-1 afin de définir les distances de sécurité et de comparer les distances de sécurité pour les stations-service hydrogène développées dans différents guides. Ces distances concernent les compresseurs et unités de stockage mais pas les électrolyseurs. Il existe une disparité importante entre les valeurs identifiées pour divers pays.

Cinq types de distances sont considérés dans les travaux préparatoires à la rédaction de l'ISO/WDTR 19880-1. Ces divers types de distances dont les définitions se recouvrent parfois en partie sont présentées ci-dessous avec des exemples de bornes des intervalles de distances identifiées dans les diverses réglementations et normes nationales référencées :

- zone de présence potentielle d'une ATEX autour de l'installation : 0 - 10 m ;
- distances d'isolement entre les unités composant l'installation : 0,5 – 12 m ;

⁴⁹ Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène, ADEME, ISBN : 979-10-297-0131-3 ; Juin 2015

- distance de protection (distance entre l'installation et des sources de danger externes : 3 – 50 m (distance minimale d'un stockage de liquide inflammable), 3-10 m (distance entre l'installation et une route carrossable) ;
- distance d'éloignement de cibles industrielles spécifiques potentielles, par exemple, unité de stockage de GPL : 5 – 20 m ;
- distance d'éloignement d'installations et établissements pouvant abriter des cibles humaines, par exemple ERP (école, hôpital...) : 2 - 100 m.

Conception de l'installation

Des études d'analyses de risques réalisées par l'INERIS, il ressort que :

- pour éviter ou réduire les conséquences des fuites d'hydrogène :
 - les raccords et le choix des matériaux doivent faire l'objet d'une attention particulière ;
 - les risques encourus et les moyens de maîtrise à mettre en œuvre dépendent fortement des débits de fuite ;
 - en cas de débit très important la dépressurisation des équipements concernés est recommandée ;
 - la nécessité de mettre en place une détection d'hydrogène sur les emplacements présentant un risque de fuite possible.

Les causes et moyens de prévention issus de l'étude ADEME concernant la prévention des fuites d'hydrogène ont été synthétisés dans le Tableau 13.

| Causes de fuite d'hydrogène | Localisation des causes | Moyens de prévention |
|--|--|--|
| Perméation (débit minime) Taille des molécules d'hydrogène | Tout équipement contenant de l'hydrogène | <ul style="list-style-type: none"> • Pour les réservoirs : revêtements polymères anti-perméation (ex : revêtements des réservoirs de type IV) |
| Usure (moyen débit) Corrosion Fatigue mécanique | Tout équipement contenant de l'hydrogène | <ul style="list-style-type: none"> • Choix des matériaux adaptés pour l'hydrogène (ex : ISO TR 15916) et pour l'hydroxyde • Prévention des vibrations et des cycles de contraintes |
| Défaut d'étanchéité (moyen débit) Raccords vissés Vibrations mécaniques sur raccords vissés | Tout équipement contenant de l'hydrogène | <ul style="list-style-type: none"> • Privilégier les raccords soudés aux raccords vissés lorsque c'est faisable |
| Rupture (grand débit) Suppressions Agression mécanique externe | Tout équipement contenant de l'hydrogène | <ul style="list-style-type: none"> • Application des normes et directives liées aux équipements sous pression |

Tableau 13 : Causes et mesures de conception pour éviter les fuites d'hydrogène

- Pour réduire le risque de mélange hydrogène et oxygène :
 - ce risque peut être prévenu dès la conception de l'électrolyseur (choix technique au niveau de la membrane, système instrumenté de sécurité, minimiser les volumes libres des séparateurs...);
 - des solutions standard de détection (concentration d'un mélange gaz, pression, température) déclenchent une dépressurisation et purge de l'installation en cas de mélange dangereux.

Les causes et moyens de prévention issus de l'étude ADEME concernant la prévention de mélange H₂/O₂ ont été synthétisés dans le Tableau 14.

| Causes de mélange H ₂ -O ₂ | Localisation des causes | Moyens de prévention |
|---|--|--|
| Rupture d'une membrane par Surchauffe ; Encrassement des membranes Défaut de refroidissement de l'eau Déséquilibre de pression Défaut de régulation de pression Bouchage d'un événement | Cellules d'électrolyse (alcaline et PEM) | <ul style="list-style-type: none"> • Contrôle de la qualité et du niveau d'eau alimentant l'électrolyseur • Mesure de la température des empilements • Mesure de la pression différentielle entre les compartiments H₂ et O₂ • Procédé DEOXO qui recombine l'oxygène en présence d'un catalyseur |
| Transfert d'H₂ dans le compartiment O₂ en aval des cellules d'électrolyse Défaillance de la boucle de pilotage Communication des deux compartiments Fuite dans un échangeur thermique commun | Compartiments H ₂ et O ₂ de l'électrolyseur (en aval des cellules d'électrolyse) | <ul style="list-style-type: none"> • Isoler et cloisonner autant que possible les compartiments H₂ et O₂ |

Tableau 14 : Causes et mesures de conception pour éviter le mélange H₂/O₂

- Pour limiter la réactivité des hydrures :
 - la présence d'air et d'eau dans le réservoir d'hydrures ainsi que la libération d'hydrures hors du réservoir doivent être évitées ;
 - le niveau de pression et l'étanchéité du réservoir doivent être garantis (gestion des surpressions et dépressions, résistance mécanique) ;
 - la teneur en eau dans l'hydrogène doit être contrôlée ;
 - en cas de réaction, des mesures de pression et température déclenchent l'inertage du réservoir.

Les causes et moyens de prévention issus de l'étude ADEME concernant la prévention pour la réactivité des hydrures ont été synthétisés dans le Tableau 15.

| Causes d'exposition des hydrures à l'air ou à l'eau | Localisation des causes | Moyens de prévention |
|---|-------------------------|--|
| Infiltration d'air extérieur Dépression dans le réservoir en phase de déstockage due à réabsorption de l'hydrogène (défaillance du système de chauffage) | Réservoir d'hydrures | <ul style="list-style-type: none"> • Mesure de la pression avec seuil et alarme associés aux dépressions. Injection de gaz inerte pour rééquilibrer la pression si nécessaire • Mise en place de soupapes étanches à l'infiltration d'air ou d'un disque de rupture en aval des soupapes |
| Présence d'eau dans l'hydrogène Défaillance de l'unité de séchage d'hydrogène | Réservoir d'hydrures | <ul style="list-style-type: none"> • Mesure continue de la teneur en eau dans l'hydrogène |
| Exposition des hydrures à l'air ambiant Rupture mécanique du réservoir par déformation progressive | Réservoir d'hydrures | <ul style="list-style-type: none"> • Conception d'un réservoir adapté aux contraintes résultant des cycles thermiques d'absorption/désorption |
| Explosion du réservoir Effet de surpression | Réservoir d'hydrures | <ul style="list-style-type: none"> • 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. |

Tableau 15 : Causes et mesures de conception pour éviter la réactivité des hydrures

Le Tableau 16 identifie les normes applicables à différentes parties de l'installation :

| Installation | Norme | Partie |
|---|-------------|---------|
| Bâtiment | | |
| Intérieur au bâtiment | NF M 58 003 | 6.6.4.1 |
| Extérieur au bâtiment | NF M 58 003 | 6.6.4.2 |
| Générateur d'hydrogène | | |
| Exigences générales | ISO 22734-1 | 5.1 |
| Exigences quant aux matériaux | ISO 22734-1 | 5.2 |
| Exigence quant à l'enveloppe du générateur | ISO 22734-1 | 5.3 |
| Équipement/composant soumis à une pression | | |
| Tuyauterie raccords et joints | ISO 22734-1 | 5.4.5 |
| | NF M 58 003 | 6.6 |
| Compresseur | ISO 22734-1 | 5.4.6 |
| Détendeurs | ISO 22734-1 | 5.4.7 |
| Instrumentations (régulation de pression, température...) | ISO 22734-1 | 5.4.8 |
| | NF M 58 003 | 6.8.7 |
| Moyens d'isollements | ISO 22734-1 | 5.4.9 |
| | NF M 58 003 | 6.8.8 |
| Systèmes de stockage | | |
| Réceptacles stationnaires de stockage d'hydrogène | NF M 58 003 | 6.9.1.1 |
| Réceptacles stationnaires sous forme d'hydrures métalliques | NF M 58 003 | 6.9.1.2 |
| | ISO 16111 | 5 |

Tableau 16 : Identification des normes applicables aux équipements et composants sur des installations d'électrolyses et stockage d'hydrogène

Comportement au feu des bâtiments

La norme NF M 58-003 (partie 7.3.3.4) recommande que les locaux abritant des installations d'hydrogène gazeux présentent les caractéristiques de réaction et de résistance au feu minimales suivantes :

- un plafond et des parois REI50 120,
- une toiture légère incombustible,
- des portes intérieures donnant vers l'extérieure EI 120.

Les portes d'accès doivent être équipées d'un ferme porte, s'ouvrant dans le sens de la sortie et pouvant être ouvertes, dans tous les cas, de l'intérieure.

Seuls les murs extérieurs ou le toit peuvent être dotés d'évents d'explosion. Ces événements doivent être conçus de façon à s'ouvrir à une pression interne maximale de 1,2 kPa conformément à la norme NF EN 14797 et doivent consister en une combinaison des dispositifs suivants : murs en matériau léger, couvercle de trappe fixés lâchement, portes battantes fixées lâchement sur les murs extérieurs et qui s'ouvrent vers l'extérieur, murs ou toit fixés lâchement.

La norme ISO 22734-1 (partie 5.3.3) préconise des classes d'inflammabilité pour les enveloppes des générateurs d'hydrogène. Elles doivent être conformes, en fonction des matériaux qui les composent, aux normes ISO 1182 ou CEI 60695-11-20 ou CEI 60695-11-10.

Ventilation

Il n'y a pas d'obligation de ventilation. Les analyses de risques réalisées par l'INERIS montrent cependant l'importance de prévoir a minima une circulation d'air permanente étudiée pour les fuites prévisibles de manière à éviter toute accumulation d'hydrogène dans des « zones mortes ».

Si une ventilation est présente, la norme ISO 22734-1 (partie 6.1.6) spécifie que la défaillance du système de ventilation doit entraîner un arrêt de la génération de gaz. Certains industriels dépressurisent en plus l'installation.

Lorsque les compartiments électriques et mécaniques sont adjacents aux compartiments de génération de gaz, ils doivent être ventilés et maintenus à une pression supérieure à celle du compartiment de génération de gaz. Cette mesure est citée dans la norme ISO 22734-1 (partie 6.1.8).

La norme NF M 58-003 (partie 8.1) introduit la notion de ventilation de sécurité qui est activée par une détection d'hydrogène et qui entraîne l'arrêt automatique de tout autre ventilation non conçue pour une atmosphère inflammable. Le débit et la disponibilité de la ventilation doivent être définis en appliquant les principes de la norme ISO EN 60079-10-1.

⁵⁰ R : Stabilité (Résistance), E : Étanchéité aux flammes (Étanchéité), I : Isolation thermique (Isolation) définis dans l'arrêté du 24 mars 2011

Mise à la terre des équipements

La norme NF M 58-003 consacre un chapitre sur la protection électrique et la mise à la terre (chapitre 5.2).

Il ressort que :

- la création de charges électriques doit être prévenue par des moyens assurant la continuité électrique (dans l'équipement et la tuyauterie) et la mise à la terre ;
- tous les éléments métalliques de l'installation d'hydrogène, y compris les supports et les autres éléments se trouvant dans une zone dangereuse classée, doivent être maintenus au niveau de potentiel de terre ;
- la résistance du système de mise à terre doit être inférieure à 25 Ω .

3.3.2 EXPLOITATION – ENTRETIEN

Surveillance de l'installation

La norme NF M 58-003 spécifie la nécessité d'une formation :

- des installateurs (parties 10.1.2),
- du personnel assurant la mise en service (parties 10.3.1),
- du personnel assurant l'entretien de l'installation (parties 11.1.1).

Elle ajoute que les utilisateurs doivent être informés et disposer des instructions du fabricant (partie 10.4).

Vérification

Des analyses de risques réalisées par l'INERIS, il est ressorti l'importance de mettre en place une maintenance préventive et prédictive pour les équipements tels que les électrolyseurs, les récipients de stockage mais aussi les compresseurs, les échangeurs...

Vérification périodique des installations électriques

La norme ISO 22734-1 dans la partie 10.4.1 décrit l'ensemble des essais électriques à réaliser. Ils se découpent en quatre points :

- les essais de continuité du circuit de protection,
- les essais de tensions,
- les essais fonctionnels,
- les essais ou vérification de l'alimentation du secteur ou dans le conducteur de protection.

Vérification des électrolyseurs et des stockages

La norme ISO 22734-1 dans la partie 10 liste les différents essais à réaliser sur les générateurs d'hydrogène : essais de pression, de dilution, de protection contre la température, d'étanchéité...

Pour les hydrures métalliques, la norme ISO 16111 indique la nécessité de mettre en place une procédure d'inspection à mettre en œuvre après chaque remplissage. Le but de cet examen est d'identifier les fuites d'hydrogène et défaut ou manque de composant au niveau de l'interface de remplissage. Des tests et inspections périodiques sont réalisés sur le corps de la bouteille au maximum tous les 5 ans.

Contrôle de l'accès

Les analyses des risques réalisées par l'INERIS ont évoqué l'importance de limiter l'accès autour des installations par la mise en place d'un système de sécurité. Certains industriels ont mis en place un accès contrôlé pour un personnel limité.

La norme NF M 58-003 donne les prescriptions suivantes :

- Les organes de contrôle des systèmes à hydrogène comportant plus de 8 kg d'hydrogène doivent être protégés de façon à prévenir tout accès non autorisé. Des avertissements à cet effet doivent être affichés.
- Si un grillage ou un mur sont utilisés à cette fin, l'ouvrage doit avoir une hauteur minimale de 2 m au-dessus du niveau du sol.

Connaissance des produits - Etiquetage

La notice d'instruction d'un électrolyseur doit comprendre un article sur les dangers liés à l'utilisation du générateur d'hydrogène. Au minimum les risques liés à la présence d'hydrogène et d'oxygène, à la manipulation de l'électrolyte et les risques liés à l'utilisation de gaz de purge doivent être couverts (norme ISO 22734-1 partie 12.3).

Concernant les hydrures, les risques de réactivité avec l'air, l'eau et les autres fluides doivent être mentionnés (norme ISO 16111 : partie 7.2).

Entretien

Chaque générateur d'hydrogène doit être accompagné d'instructions réunies en un guide d'entretien. Ce guide doit fournir les méthodes recommandées pour le nettoyage régulier des pièces essentielles et spécifier la fréquence de nettoyage des filtres (norme ISO 22734-1 partie 12.6).

3.3.3 DISPOSITIFS ET CONSIGNES DE SECURITE

Equipements électriques de sécurité

Les industriels ont mentionné que la sécurité dans les containers était assurée principalement par des circuits de contrôle-commande spécifiques et que leur fiabilité était assurée par des mesures telles que la mise en place d'automates dédiés, la redondance et des exigences quant au niveau de SIL des systèmes instrumentés de sécurité.

La norme ISO 22734-1 (partie 6.2.4) énonce que les circuits de contrôle-commande de sécurité doivent être conçus conformément à la CEI 61069-7 et la CEI 61511-1.

Les circuits de contrôle de sécurité doivent être conçus de façon que la défaillance d'un composant fonctionnel essentiel mette le générateur d'hydrogène en mode de sauvegarde.

En complément, la partie 7 de la norme ISO 22734-1 spécifie les attentes pour les systèmes de commande et consacre :

- la partie 7.3 à la fonction de commande dans l'éventualité d'une défaillance,
- la partie 7.4 aux systèmes de commande à distance.

Matériels utilisables en atmosphère explosible

La norme ISO 22734-1 (partie 6.1.3) expose que les équipements placés dans des zones classées à risque de formation d'ATEX doivent être conformes aux exigences de la CEI 60079-0 et des parties appropriées de la CEI 60079 pour le(s) type(s) de protection utilisés ou de la CEI 60079-30-1.

Lorsque l'équipement est prévu pour des conditions qui ne sont pas couvertes par le domaine d'application des normes internationales CEI 60079 ou par le domaine d'application de la CEI 60079-30-1 (par exemple fonctionnement dans une atmosphère enrichie en oxygène), on doit effectuer des essais supplémentaires liés spécifiquement aux conditions d'utilisation prévues.

Consignes de sécurité et d'exploitation

Il ressort des analyses des risques réalisées par l'INERIS⁵¹ l'importance d'établir des procédures pour les opérations en fonctionnement normal mais également pour la maintenance, le démarrage et l'arrêt de l'installation. Ces procédures doivent détailler la gestion des gaz et les phases de purge.

Les normes NF M 58-003, ISO 22734-1 et ISO 16111 détaillent les consignes de sécurité pour les installations d'hydrogène, les électrolyseurs et les stockages que les fabricants doivent fournir à chaque utilisateur. Le Tableau 17 donne les références des chapitres des normes où ces consignes sont décrites.

| Installation | Norme | Partie |
|---|-------------|--------|
| Consignes concernant les installations d'hydrogène | NF M 58-003 | 10.4 |
| Consignes concernant le générateur d'hydrogène | ISO 22734-1 | 12 |
| Consignes concernant les stockages sous forme d'hydrure | ISO 16111 | 8 |

Tableau 17 : Références des chapitres dans les normes qui détaillent les consignes de sécurité et d'exploitation transmises par le fabricant

Détection de gaz

La norme 22734-1 énonce que les détecteurs utilisés à des fins de sécurité doivent être conformes à la CEI 60079-29-1. Le fabricant doit garantir que le choix, l'installation, l'utilisation et l'entretien des détecteurs d'hydrogène sont conformes à la CEI 60079-29-2. Les détecteurs doivent être installés aux emplacements les mieux adaptés à la détection la plus précoce possible de l'hydrogène, de façon que leurs fonctions de protection puissent être éprouvées. Des moyens d'autovérification doivent être fournis pour les détecteurs d'hydrogène utilisés à des fins de sécurité.

La norme NF M 58 003 (partie 8.2) spécifie que le système de détection doit être mis en œuvre lorsque le volume libre de l'enceinte et/ou la ventilation permanente ne permet pas d'exclure la formation d'une atmosphère inflammable potentiellement dangereuse.

⁵¹ Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène, ADEME, ISBN : 979-10-297-0131-3 ; Juin 2015

Les mesures pouvant être déclenchées par la détection pour éliminer l'atmosphère inflammable, en réduire la dangerosité, ou en limiter la durée de persistance sont les suivantes :

- déclenchement de systèmes d'alarme sonores et/ou visuels ;
- arrêt du dégagement d'hydrogène par isolement en amont du/des point(s) de dégagements ;
- mise en place ou augmentation de la ventilation par démarrage d'un ventilateur ou l'ouverture de trappes vers l'extérieur ;
- la suppression des sources électriques d'inflammation par mise hors tension.

Les capteurs destinés à détecter une accumulation doivent être localisés en partie haute de l'enceinte.

Protection et mise en sécurité

La norme NF M 58 003 (partie 9) spécifie aussi les systèmes de mise en sécurité de l'installation en cas d'occurrence d'un scénario d'incident. Ceux-ci incluent des dispositifs d'arrêt d'urgence, des vannes d'isolement de sécurité, des équipements de protection contre les surpressions et des dispositifs de décharge d'urgence (DDU). Ces derniers permettent de vider rapidement et sans danger des capacités contenant de l'hydrogène.

3.3.4 MESURES SPECIFIQUES A DES ENVIRONNEMENTS NATURELS ET HUMAINS PARTICULIERS

Les installations d'électrolyse peuvent être mises en œuvre dans des environnements naturels et humains divers dont les contraintes spécifiques doivent être prises en compte. Le Tableau 18 présente quelques exemples d'environnement dans lesquels ont été implantés des électrolyseurs.

| Environnement humain | |
|---|---|
| Environnement | Exemple d'installation |
| Zones urbanisées | Stations-service en centre-ville http://cleanenergypartnership.de/en/h2-infrastructure/cep-filling-stations/ |
| Etablissement recevant du public | Projet d'électrolyseur dans une crèche http://www.lemonde.fr/planete/article/2014/02/27/l-hydrogene-dope-par-le-soleil-et-le-vent_4374369_3244.html |
| Installation ICPE | Implantation d'électrolyseur sur des sites soumis à autorisation |
| Installations isolées | Refuges http://www.enerzine.com/14/18181+de-lhydrogene-energie-pour-les-randonneurs-du-parc-de-la-vanoisee+.html |

| Environnement naturel | |
|----------------------------------|---|
| <i>Climat/</i> | <i>Exemple de pays/ où se trouvent des électrolyseurs</i> |
| Tropical | Brésil http://www.fuelcelltoday.com/news.archive/2006/november/hydrogenics-to-provide-refuelling-station-for-brazil-fuel-cell-bus-project |
| Continental | Russie http://www.mcphy.com/en/news/releases/release-719/ |
| Montagnard | Alpes http://www.enerzine.com/14/18181+de-lhydrogene-energie-pour-les-randonneurs-du-parc-de-la-vanoisee+.html |
| Aride | Maroc http://www.afhypac.org/images/documents/gazette_obs_31hd.pdf |
| <i>Environnement particulier</i> | <i>Exemple de pays ou d'installation</i> |
| Zone sismique | Electrolyseurs aux Etats-Unis (Californie) et Japon |
| Environnement inondable | Electrolyseur sur une centrale hydroélectrique http://www.limpartial-andelys.fr/2015/02/18/port-mort-la-societe-wh2-va-produire-de-l%E2%80%99hydrogene-vert/ |
| Environnement alcalin | Projet en Algérie et Egypte |

Tableau 18 : Exemples de la diversité des environnements naturel et humain sur lequel on peut retrouver des électrolyseurs

Face à la diversité des environnements, les industriels ont mis en place des mesures de maîtrise de risques spécifiques dont voici quelques exemples :

- Pour les environnements salins, les fabricants ont sélectionnés des revêtements/ matériaux pour éviter la corrosion. Des contrôles sont ajoutés au niveau des prises d'air.
- Pour les climats froids (climat continental ou montagnard), des systèmes de chauffage ont été mis en place pour réguler la température et éviter le gel de l'eau déminéralisée. Une ventilation forcée est ajoutée pour fonctionner en cas de détection d'hydrogène.
- Pour les zones sismiques, les installations sont soumises à des normes de construction spécifiques, les équipements sont fixés et des scénarios particuliers sont envisagés lors de l'analyse des risques.
- Pour les électrolyseurs installés dans un environnement tropical, l'installation électrique est sélectionnée pour résister aux atmosphères chaudes et humides et des grilles de protection peuvent être mises au niveau des ouvertures pour éviter les problèmes liés aux insectes.
- Dans les zones arides, les industriels rencontrent des problèmes liés à l'empoussièrement (sable) et à la chaleur. Le refroidissement d'équipement tel que le redresseur à l'eau plutôt qu'à l'air est privilégié. Une maintenance renforcée est mise en place pour suivre ces installations.

3.4 SYNTHÈSE SUR LE RETOUR D'EXPERIENCE ET L'ANALYSE DES RISQUES

L'étude des accidents recensés autour des installations de production et de stockage d'hydrogène et l'analyse préliminaire des risques met en évidence les points suivants :

- le stack, le séparateur, les électrolyseurs, et les hydrures du fait de leur réactivité, pour le stockage, s'avèrent être des éléments sensibles ;
- les équipements autour des électrolyseurs tels que les compresseurs, les tuyauteries, les échangeurs, les unités de purification des gaz, etc. sont également à surveiller car ils peuvent être soumis à des contraintes de température (avec le SOEC) et de pression (avec l'évolution des électrolyseurs vers des pressions importantes) ;
- selon les données disponibles, la corrosion, la fatigue mécanique et la défaillance de pièces isolées sont régulièrement responsables d'accidents. Ces phénomènes peuvent être anticipés et maîtrisés par des standards de design et par des procédures plus strictes d'entretien et de maintenance des équipements.

Des analyses de risques ont été réalisées par l'INERIS dans le cadre d'une étude pour l'ADEME et du projet DEMETER.

Ces analyses de risques ont fait ressortir trois événements redoutés :

- la fuite d'hydrogène,
- le mélange d'hydrogène et d'oxygène,
- la réaction des hydrures avec l'air ou l'humidité.

Les mesures de maîtrise des risques à adopter pour faire face à ces scénarios ont principalement pour objectif :

Stockage

- éviter toute fuite d'hydrogène,
- éviter l'arrivée d'impuretés dans les hydrures utilisés pour le stockage d'hydrogène,
- maîtriser le chauffage et le refroidissement des hydrures pendant les phases de désorption et d'absorption.

Electrolyseur

- prévoir le système de telle manière que les quantités mélangées H₂/O₂ ou relâchées soient les plus limitées possibles, et détecter le plus rapidement possible la présence du mélange ;
- s'il y a risque de mélange H₂/O₂, prévoir toutes les dispositions utiles de nature à éliminer le mélange (purge du système) ;
- s'assurer que les fuites potentielles ne puissent intervenir qu'en milieu non confiné, et s'il y a risque de relâchement en milieu confiné, prévoir toutes les dispositions utiles de nature à éviter une accumulation de l'hydrogène relâché ;
- s'il y a des dérives des paramètres de fonctionnement, prévoir toutes les dispositions utiles de nature à limiter les conséquences.

Afin de répondre à ces objectifs, une synthèse de l'état de l'art de la maîtrise des risques est présentée au chapitre 4.3. Elle est issue des analyses de risques, des normes et des discussions avec les industriels. Cette synthèse est présentée en suivant la structure d'un arrêté et d'un projet d'arrêté qui encadrent des activités mettant en œuvre de l'hydrogène. Cette analyse préliminaire ne vise pas l'exhaustivité ; elle pourra être complétée par une analyse approfondie des textes identifiés.

Les points qui ressortent de cette première analyse sont les suivants :

- les mesures de maîtrise des risques techniques applicables à ces installations sont connues et issues, pour la plupart, de l'expérience des gaziers ;
- elles sont, au besoin, complétées de mesures spécifiques aux environnements naturels et humains particuliers dans lesquels peuvent être exploitées ces installations (cf. chapitre 3.3.4) ;
- une vigilance est à conserver vis-à-vis du transfert des installations vers les utilisateurs (formation et information) qui ne sont pas issus de l'industrie gazière (installations implantées dans des stations-service ou d'autres ERP, systèmes isolés ...) ;
- une attention est à porter à la fiabilité des systèmes instrumentés de sécurité en particulier pour les systèmes qui peuvent fonctionner en autonomie (système isolé) en utilisant des automates de conduite ;
- les phases d'arrêt (entre deux démarrages, arrêts d'urgence...) et de démarrage sont à définir clairement au niveau de la gestion des gaz.

4. PRESENTATION DE LA REGLEMENTATION, DES NORMES, GUIDES ET AUTRES DOCUMENTS DE REFERENCE

Les textes présentés dans ce chapitre sont issus :

- d'une analyse bibliographique de documents réglementaires, de normes et de guides professionnels ;
- d'informations collectées au cours d'une enquête réalisée sur la base d'un questionnaire envoyé aux industriels, experts et administrations de plusieurs pays (cf. la présentation du questionnaire partie 1.1).

Les exigences concernant les électrolyseurs et les stockages d'hydrogène proviennent de sources variées :

- les réglementations générales telles que des directives européennes de sécurité dites de la « Nouvelle approche » (directives concernant les atmosphères explosives, les équipements sous pression, les machines...);
- les normes internationales ISO spécifiques à l'emploi d'hydrogène, d'oxygène, aux électrolyseurs et stockage d'hydrogène ;
- les normes ou guides spécifiques à un pays ou à une association d'industriels.

Le panorama des sources applicables aux électrolyseurs et aux stockages d'hydrogène est donc très étendu et rassemble un grand nombre d'exigences. Il a donc été choisi de prioriser les sources selon deux critères :

- la spécificité des textes par rapport aux électrolyseurs et stockages d'hydrogène ;
- le caractère de référence du texte (ex : les normes ISO 22734-1/2 qui sont citées par les fabricants comme documents de références concernant les électrolyseurs).

Il a été choisi de présenter dans un premier temps les sources internationales, européennes, nationales et celles issues d'association d'industriels puis les sources spécifiques à un composant de l'installation.

4.1 CONTEXTE NORMATIF

Différentes normes ont été éditées concernant :

- l'hydrogène,
- les électrolyseurs,
- le stockage d'hydrogène.

Ces normes sont principalement internationales (ISO). Certaines normes ont été déclinées en version européenne (EN) ou française (NF). Dans ce cas là, seules ces versions sont référencées dans le tableau.

Concernant l'hydrogène, le comité technique ISO TC 197 « Technologie de l'hydrogène » conçoit des normes sur les systèmes et dispositifs de production, de stockage, de transport, de détection et d'utilisation de l'hydrogène (cf. annexe 2 sur les champs et normes couverts par les GT ISO TC 197).

Les tableaux ci-dessous décrivent chaque norme par son numéro d'identification et son libellé.

4.1.1 TEXTE GENERAL RELATIF A LA SECURITE DES SYSTEMES A L'HYDROGENE

Le rapport technique, FD ISO/TR 15916 :2006, concernant l'utilisation de l'hydrogène en phase gaz et liquide, identifie les questions fondamentales relatives à la sécurité et aux risques, et liées à la mise en œuvre de l'hydrogène. Le comité technique ISO TC 197 révisé actuellement cette norme.

| Norme | Nom de la norme |
|---------------------------------|--|
| FD ISO/TR 15916 2006 | Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène |

4.1.2 TEXTES RELATIFS AUX STOCKAGES D'HYDROGENE

Concernant le stockage, nous nous sommes concentrés sur les techniques de stockage associées à des électrolyseurs : stockage d'hydrogène sous forme de gaz sous pression et stockage sous forme d'hydrures.

4.1.2.1 STOCKAGE SOUS FORME DE GAZ SOUS PRESSION

Les récipients d'hydrogène gaz sous pression sont fabriqués selon la norme :

| Norme | Nom de la Norme |
|-----------------------------|--|
| ISO 16528-1 2007 | Chaudières et récipients sous pression <u>Partie 1</u> : exigences de performance |

Les dispositifs de sécurité contre la surpression suivent les exigences suivantes :

| Norme | Nom de la Norme |
|----------------------------------|---|
| NF EN ISO 4126-1 2013 | Dispositifs de sécurité pour protection contre les pressions excessives – <u>Partie 1</u> : soupapes de sûreté |
| NF EN ISO 4126-2 2003 | Dispositifs de sécurité pour la protection contre les pressions excessives – <u>Partie 2</u> : dispositifs de sûreté à disque de rupture |

L'ISO/DIS 15399 prend en compte les récipients de stockage en matériau métallique sans soudure ou en matériau composite utilisés pour le stockage stationnaire d'hydrogène gazeux. Le comité technique ISO TC 197 révisé cette norme pour intégrer les spécificités des stockages composites à travers le projet ISO/CD 19884 (cf. annexe 2).

| Norme | Nom de la Norme |
|-------------------------------|--|
| ISO/DIS 15399 2012 | Hydrogène gazeux Bouteilles et tubes pour stockage stationnaire |

Les récipients de stockage avec soudure utilisés pour le stockage stationnaire d'hydrogène gazeux doivent être conformes aux exigences de la norme NF EN 13445-3 et doivent être contrôlés conformément à la norme NF EN 13445-5.

| Norme | Nom de la Norme |
|-------------------------------|---|
| NF EN 13445-3 2014 | Réceptacles sous pression non soumis à la flamme <u>Partie 3</u> : conception |
| NF EN 13445-5 2014 | Réceptacles sous pression non soumis à la flamme <u>Partie 5</u> : inspection et contrôles |

4.1.2.2 STOCKAGE SOUS FORME D'HYDRURE

L'ISO 16111 : 2008 définit les exigences applicables aux matériaux, à la conception, à la fabrication et à la mise à l'essai des systèmes de stockage de l'hydrogène gazeux transportables, appelés systèmes à hydrures métalliques, qui utilisent des enveloppes ayant un volume interne inférieur ou égal à 150 l et ayant une pression développée maximale (MDP) ne dépassant pas 25 MPa (250 bar).

Elle est applicable uniquement aux systèmes à hydrures métalliques de stockage rechargeables où l'hydrogène est le seul élément transféré.

L'ISO 16111 : 2008 est destinée à être utilisée à des fins de certification. Elle est exigée au niveau de la réglementation de transport de matières dangereuses notamment pour le transport routier ADR.

| Norme | Nom de la Norme |
|---------------------------|--|
| ISO 16111 2008 | Appareils de stockage de gaz transportables Hydrogène absorbé dans un hydrure métallique réversible |

Cette norme est revue par le comité technique ISO TC 197 afin de prendre en compte les évolutions technologiques des systèmes à hydrures métalliques (forme et type du réservoir et sa taille).

4.1.3 TEXTES SPECIFIQUES A L'ELECTROLYSE

Concernant la production sur site, des normes ISO ont été éditées spécifiquement pour chaque procédé. Ces normes reprennent les exigences au niveau de la construction ainsi que de la sécurité de chaque procédé. Pour les générateurs d'hydrogène tels que les électrolyseurs, on trouve des spécificités en fonctions des domaines d'applications industrielles et résidentielles.

| Norme | Nom de la Norme |
|-----------------------------|---|
| ISO 22734-1 2008 | Générateurs d'hydrogène utilisant le procédé d'électrolyse de l'eau <u>Partie 1</u> : Applications industrielles et commerciales |
| ISO 22734-2 2011 | Générateurs d'hydrogène utilisant les procédés d'électrolyse à l'eau <u>Partie 2</u> : Applications résidentielles |

En dehors de ces normes spécifiques à l'électrolyseur, des normes générales s'appliquent qui sont liées aux réglementations européennes « Nouvelle approche » telles que machine, équipement sous pression... Ces normes sont présentées en annexe 3.

Spécificité pour la France :

Au niveau français, la norme NF M58-003 a été publiée en décembre 2013. Cette norme se propose, sous la forme d'un guide, de définir l'ensemble des exigences de conception et d'installation à satisfaire pour assurer les conditions de sécurité requises pour les systèmes mettant en œuvre l'hydrogène. Ce document n'est pas spécifique aux électrolyseurs et stockages.

| Norme | Nom de la norme |
|----------------------------|--|
| NF M58-003 2013 | Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène |

Ce document vise toutes les installations faisant appel à l'hydrogène gazeux, y compris en environnement non industriel et en 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 Nm³/h.

La Figure 19 indique les différents éléments pouvant composer un système mettant en œuvre l'hydrogène selon la norme NF M 58-003 : 2013.

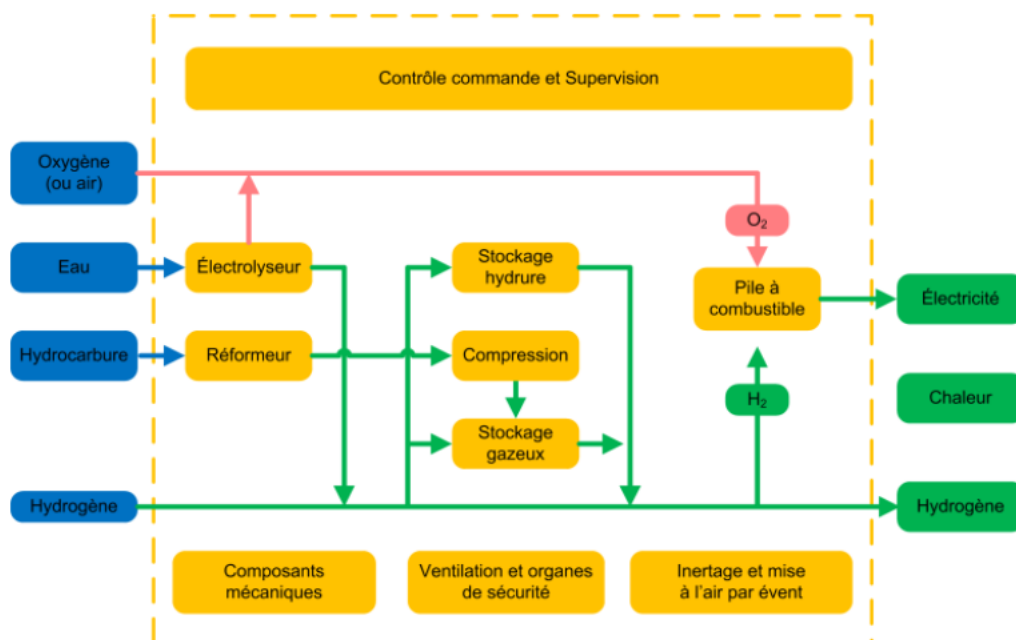


Figure 19 : Schéma d'ensemble d'un système mettant en œuvre l'hydrogène⁵²

⁵² NF M58-003 décembre 2013- Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène

4.2 REGLEMENTATION EUROPEENNE

En Europe, les concepteurs et exploitants d'électrolyseurs et stockage d'hydrogène doivent s'assurer du respect des exigences des directives européennes « Nouvelle approche » applicables à ces installations. Ces directives présentent des mesures génériques qui ne sont pas spécifiques aux installations mettant en œuvre de l'hydrogène.

| Directive | Nom de la directive |
|--------------------|--|
| 2014/68/UE | Directive n° 2014/68/UE du 15/05/14 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression. |
| 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. |
| 2012/18/UE | Directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3. concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, modifiant puis abrogeant la directive 96/82/CE du Conseil. |
| 2010/75/UE | Directive n° 2010/75/UE du 24/11/10 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution). |
| 2010/35/UE | Directive n° 2010/35/UE du 16/06/10 relative aux équipements sous pression transportables. |
| 2009/142/CE | Directive n° 2009/142/CE du 30/11/09 concernant les appareils à gaz. |
| 2008/68/CE | Directive n° 2008/68/CE du 24/09/08 relative au transport intérieur des marchandises dangereuses. |
| 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. |
| 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. |
| 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. |

Ces directives ont donné lieu à l'élaboration de normes qui ne sont pas spécifiques à l'hydrogène mais des normes générales applicables présumant de la conformité de l'installation aux exigences essentielles des directives européennes (cf. annexe 3).

4.3 GUIDES EUROPEENS

L'association européenne des industriels du gaz (EIGA) présente les recommandations de la profession concernant la production, la manipulation et le transport de l'hydrogène dans l'industrie.

| Guide | Nom du guide |
|---|---|
| Doc. 121/14 2014 | Hydrogen Pipeline Systems |
| <p><i>Ce document est destiné à fournir des conseils sur la conception et le maintien des systèmes de transport et distribution d'hydrogène pur ou en mélange. Il n'a pas vocation à être obligatoire. Il contient un résumé des mesures mises en place par les industriels. Il est basé sur les connaissances et le retour d'expérience des producteurs en Europe et Amérique du Nord.</i></p> <p><i>Ce document reprend :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • les définitions et la philosophie de conception de ces équipements ; • les critères de sélection des canalisations, vannes et équipements ; • les exigences en termes de construction, gestion et nettoyage des installations ; • les mesures de maîtrise des risques liées à la protection. | |
| Doc. 171/12 2012 | Storage of Hydrogen in Systems Located Underground |
| <p><i>Ce document aborde les exigences spécifiques au stockage de l'hydrogène enterré.</i></p> <p><i>Ce document couvre :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • le stockage d'hydrogène liquides et systèmes associés ; • le stockage d'hydrogène composé d'une container ou plusieurs cylindres ou bouteilles. <p><i>Des points spécifiques sont abordés tels que l'inspection périodique des systèmes de stockages gaz enterrée. Ce document ne traite pas de la conception, du choix des matériaux et de la construction des récipients sous pression.</i></p> | |
| Doc. 122/11 2011 | Environmental Impacts of Hydrogen Plants |
| <p><i>Ce document est destiné à servir de guide général pour les entreprises produisant de l'hydrogène pour aider à mettre en place un système de gestion de la sécurité.</i></p> <p><i>Il fournit également la base pour établir les meilleures techniques disponibles pour l'application de la directive 2010/75/UE du Parlement européen relative aux émissions industrielles. Il ne se veut pas un guide de conception détaillée pour les installations mettant en œuvre l'hydrogène, mais peut être utilisé pour identifier les impacts possibles.</i></p> | |
| Doc. 100/11 2011 | Hydrogen Cylinders and Transport Vessels |
| <p><i>Ce document décrit les retours d'expériences concernant le stockage d'hydrogène par compression et fournit un certain nombre de recommandations pour la spécification, la fabrication, les essais, l'entretien et le montage des réservoirs et bouteilles.</i></p> | |
| PP 16/07 2007 | Proposal to change the IPPC Directive with regards to hydrogen production |
| <p><i>Proposition visant à modifier la directive IPPC en ce qui concerne la production d'hydrogène</i></p> <p><i>Ce document expose le point de vue de l'EIGA sur la directive IPPC. EIGA souhaiterait la modification de la directive et l'introduction de seuils pour favoriser la production d'hydrogène ainsi que le développement d'infrastructure .</i></p> | |

L'association européenne des industriels du gaz (EIGA) a également édité un guide concernant les canalisations et tuyauteries d'oxygène.

| Guide | Nom du guide |
|---|------------------------------------|
| Doc. 13/12 2012 | Oxygen Pipeline and Piping Systems |
| <p><i>Ce document fournit des conseils pour la sécurité à la conception, l'exploitation et l'entretien des tuyauteries et canalisations d'oxygène.</i></p> <p><i>Le document concerne principalement les canalisations en métal transportant de l'oxygène et les systèmes de distribution. Il traite de l'oxygène gazeux à une température comprise entre -30°C et 200°C et une pression maximale de 21 Mpa.</i></p> <p><i>Ce document reprend :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>les définitions et la philosophie de conception de ces équipements ;</i> • <i>les critères de sélection des canalisations, vannes et équipements ;</i> • <i>les exigences en termes de construction, gestion, maintenance et nettoyage des installations ;</i> <p><i>les mesures de maîtrise des risques liées à la protection.</i></p> | |

4.3.1 TEXTES SPECIFIQUES POUR CERTAINS PAYS EUROPEENS

Plusieurs pays européens ont mis en place des guides spécifiques regroupant des exigences ou recommandations concernant les installations d'hydrogène. Ces guides ne sont pas spécifiques aux électrolyseurs ni au stockage d'hydrogène.

| Pays | Guide | Nom du guide |
|--|---------------|--|
| Allemagne | 2011 | Sichere Wasserstoffinfrastruktur |
| <p><i>L'objectif de ce guide est de créer une base de données reprenant les projets de développements en cours et les normes et réglementations mises en application. A cet effet, les retours d'expérience et les résultats de projets industriels ont été compilés et analysés, concernant les thématiques suivantes : sécurité de l'utilisation de l'hydrogène liée aux véhicules (tels que les stations d'essence les, garages, etc.) et le transport de l'hydrogène (par exemple, à travers les tunnels).</i></p> <p><i>L'une des propositions clés de cette étude est de créer une base harmonisée et obligatoire concernant le remplissage d'hydrogène en stations dans toute l'Allemagne.</i></p> <p><i>Par exemple : l'ISO 20100 est reprise pour la normalisation des interfaces et les paramètres de conception ainsi que les distances de sécurité.</i></p> | | |
| Angleterre | RR715 2009 | Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications : UK version |
| <p><i>Ce guide a été développé en réponse à la demande croissante de conseils pour favoriser l'utilisation et l'installation d'infrastructure contenant de l'hydrogène en Europe.</i></p> <p><i>Ce document présente une partie spécifiquement destinée au marché britannique. Il fait référence aux réglementations nationales, normes et mesures mises en œuvre au Royaume-Unis</i></p> <p><i>Ce guide s'applique aux systèmes stationnaires alimentés par de l'hydrogène, incorporant des dispositifs de pile à combustible avec une puissance électrique nette allant jusqu'à 10 kW électriques et avec des puissances totales de l'ordre de 50 kW (production combinée de chaleur + électricité) appropriés pour les petits fournisseurs en électricité, le chauffage résidentiel, la chaleur-puissance combinée (CHP) et les petits systèmes de stockage.</i></p> <p><i>Beaucoup de lignes directrices décrites pour ces petits systèmes seront également applicables aux systèmes jusqu'à 100 kW électriques, qui serviront aux associations ou groupement de consommateurs.</i></p> <p><i>Le document ne constitue pas une norme, mais est un recueil d'informations utiles pour une variété d'utilisateurs avec un rôle dans l'installation de ces systèmes, y compris les ingénieurs de conception, les fabricants, architectes, installateurs, opérateurs / travailleurs de l'entretien et des régulateurs.</i></p> | | |

| Pays | Guide | Nom du guide |
|---------|--|--|
| Norvège | Report No. 2007-1865 APPENDIX A 2007 | Coordination of Norwegian Hydrogen related activities within safety, regulations and standardization Regulations, Codes and Standards |
| | <i>Ce guide reprend les normes et guides (nationaux, européens et internationaux) concernant les infrastructures utilisant de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Les référentiels présentés ne sont pas tous spécifiques aux installations mettant en œuvre de l'hydrogène (directives ATEX, équipements sous pression...) et certains sont toujours en développement (groupes normatifs).</i> | |
| | Report No.117216 2012 | Safety and Emergency Plan |

4.4 TEXTES SPECIFIQUES A L'AMERIQUE DU NORD

Plusieurs pays en Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada) ont mis en place des guides ou normes spécifiques regroupant les exigences ou recommandations concernant les installations mettant en œuvre de l'hydrogène.

4.4.1 ETATS-UNIS

Les Etats-Unis sont un pays fédéral : de fait, il existe de nombreux textes et guides dédiés à l'hydrogène et publiés soit par le gouvernement fédéral, soit spécifiques à un état, soit par la « National Fire Protection Association » ou l'instance fédérale de normalisation (ANSI).

4.4.1.1 CONTEXTE AU NIVEAU FEDERAL

Le département de l'énergie

Le département de l'Energie (DOE) travaille à développer et favoriser la transmission d'informations pour assurer la sécurité des installations d'hydrogène.

Un site Internet a été créé par le département de l'énergie et les éléments suivants ont été mis à disposition :

| Documents | Lien |
|---|---|
| H2 Safety Snapshot newsletter | http://energy.gov/eere/fuelcells/h2-safety-snapshot-newsletter |
| <i>Cette newsletter est un bulletin trimestriel concernant la sécurité de l'hydrogène et décrit les mesures de maîtrises des risques et retour d'expériences vis-à-vis des installations d'hydrogène.</i> | |
| Hydrogen Safety Bibliographic Database | http://www.hydrogen.energy.gov/biblio_database.html |

| Documents | Lien |
|---|---|
| <p>Cette base de données rassemble des références de rapports, des articles, des livres et d'autres ressources pour l'information sur la sécurité de l'hydrogène en ce qui concerne la production, le stockage, la distribution et l'utilisation. Ces références ont été assemblées de 1990 à 2008.</p> <p>La base de données contient des références relatives aux sujets suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les propriétés et le comportement de l'hydrogène, • les procédures d'exploitation et de maintenance, • les fuites, la formation et dispersion des nuages de gaz inflammable, • la fragilisation et d'autres effets sur les propriétés des matériaux, • les piles à combustible et d'autres technologies de conversion d'énergie, • les capteurs, détecteurs et technologies de détection de fuites, • les accidents et incidents impliquant de l'hydrogène. | |
| Hydrogen Incident Reporting Database | http://www.h2incidents.org/ |
| <p>La base de données contient des enregistrements de défaillances, incidents et/ou accidents impliquant l'hydrogène ou des technologies liées à l'hydrogène.</p> | |
| Permitting Hydrogen Facilities | http://www.hydrogen.energy.gov/permitting/ |
| <p>Cette page identifie les codes et les normes applicables pour aider les autorités locales dans le processus d'autorisation de la mise en service des installations mettant en œuvre de l'hydrogène.</p> | |
| Hydrogen Safety for First Responders | http://www.hydrogen.energy.gov/firstresponders.html |
| <p>Le département de l'énergie a mis en ligne un cours qui fournit une vue d'ensemble des règles à suivre sur une installation contenant de l'hydrogène. Ce tutoriel a pour but de familiariser les opérationnels avec l'hydrogène : ses propriétés physico-chimiques, comment il se comporte par rapport à d'autres combustibles; les dangers potentiels, les mesures de protection...; et des ressources supplémentaires, y compris des vidéos, des documents, et des liens.</p> | |
| Introduction to Hydrogen for Code Officials | http://www.hydrogen.energy.gov/training/code_official_training/ |
| <p>Le département de l'énergie a mis en ligne un cours en ligne pour les fonctionnaires qui donne un aperçu des risques liés à l'hydrogène, les technologies utilisant de l'hydrogène et leurs applications, et les codes et les normes nécessaires pour leur permettre l'autorisation d'une installation.</p> | |
| Hydrogen Safety Best Practices Manual | http://h2tools.org/bestpractices |
| <p>Le guide sur la sécurité de l'hydrogène est un guide mis en ligne qui rassemble les connaissances et les retours d'expériences liés à la manipulation et l'utilisation sans danger de l'hydrogène.</p> | |

Le DOE travaille avec des organisations nationales et internationales afin de faciliter la création et l'adoption de codes de construction et de normes concernant l'utilisation d'hydrogène dans des applications commerciales, résidentielles et de transport. Le DOE fournit des ressources techniques pour faciliter l'élaboration de normes harmonisées.

Le département du travail

Le département du travail a édité une réglementation concernant les installations contenant de l'hydrogène gazeux ou liquide. Elle définit des exigences au niveau des dispositifs de sécurité, de la conception des tuyauteries et des raccords, des distances de sécurité en fonction de la taille du système, du choix des matériaux de constructions, de la ventilation des systèmes, du marquage, de la maintenance et de la vérification des équipements.

| Réglementation | Lien |
|---|---|
| OSHA Occupational Safety & Health Administration OSHA 29CFR1910.103 Hydrogen Dernière mise à jour : 2007 | https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.showdocument?p_table=STANDARDS&p_id=9749 |

4.4.1.2 SPECIFICITES REGLEMENTAIRES AU NIVEAU DES ETATS

Californie

L'état de Californie a édité un rapport qui fournit les exigences et normes pour la conception et la construction des stations-service d'hydrogène et définit la procédure d'autorisation.

| Réglementation | Lien |
|--|---|
| Regulations, Codes, and Standards (RCS) Template for California Hydrogen Dispensing Stations 2012 | http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56223.pdf |

Michigan

L'état du Michigan a édité des règles concernant le stockage (aérien et enterré) et la manutention d'hydrogène (gaz et liquide).

| Réglementation | Lien |
|--|---|
| Storage and Handling of Gaseous and Liquefied Hydrogen 2008 | https://www.michigan.gov/lara/0,4601,7-154-35299_42271_4115_4237-191043--,00.html |

Caroline du Sud

L'état de Caroline du Sud a édité une loi pour identifier la procédure d'autorisation et les autorités compétentes pour valider la démarche pour les installations d'hydrogène.

| Réglementation | Lien |
|--|---|
| SOUTH CAROLINA HYDROGEN PERMITTING ACT 2010 | http://scstatehouse.gov/sess118_2009-2010/bills/3835.htm |

4.4.1.3 NFPA

NFPA est une association qui a pour but principal la prévention des incendies. Elle rédige et préconise des codes, des normes et fait également de la recherche et de la formation.

Le standard américain NFPA 2 définit des exigences pour la conception, la production, le stockage, le transfert, l'utilisation et la manipulation d'hydrogène. Le chapitre 13 de ce référentiel concerne les équipements produisant de l'hydrogène dont l'électrolyseur (chapitre 13.3.1 de la norme NFPA 2). Le stockage d'hydrogène gazeux est traité dans la partie 7, plus spécifiquement au chapitre 7.1.4.

| Norme | Nom de la norme |
|------------------------|----------------------------|
| NFPA 2 2011 | Hydrogen Technologies Code |

Le standard américain NFPA 55 concerne à la fois les systèmes hydrogène gaz et liquide. Le référentiel couvre l'exploitation et la protection incendie des stations-service d'hydrogène. Le standard NFPA 55 abroge les NFPA 50A et NFPA 50B qui s'appliquaient respectivement aux systèmes gaz et liquide. Les chapitres 10 et 11 concernent respectivement les stockages d'hydrogène gaz et liquide. Les stockages d'hydrure sont traités au chapitre 7.1.5.

| Norme | Nom de la norme |
|-------------------------|--|
| NFPA 55 2013 | Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code |

4.4.1.4 INTERNATIONAL FIRE CODE

Le but de ce code est d'identifier les situations dangereuses dans les bâtiments neufs et existants, d'établir les exigences minimales concernant la protection contre les risques d'incendie, d'explosion et de définir les règles d'intervention lors d'opérations d'urgence.

Concernant l'hydrogène, ce code traite notamment :

- chapitre 22 : stations-service avec un chapitre spécifique sur le stockage et production d'hydrogène (section 2209) ;
- chapitre 53 : gaz comprimé ;
- chapitre 58 : gaz inflammable avec un chapitre spécifique (section 5807) sur les hydrures.

| Norme | Lien |
|---|---|
| International Fire Code 2012 | http://publicecodes.cyberregs.com/icod/ifc/index.htm |

4.4.1.5 ASME

The American Society of Mechanical Engineers (ASME) a édité des guides concernant le transfert d'hydrogène et les récipients sous pression.

| Guide | Nom du guide |
|---|---|
| ASME B31.12 2011 | Hydrogen piping and pipelines |
| <i>Cette norme contient les exigences vis-à-vis des tuyauteries et canalisations transportant et distribuant de l'hydrogène pour des applications commerciales et résidentielles.</i> | |
| ASME STP-PT-006 2007 | Design Guidelines for Hydrogen Piping and Pipelines |
| <i>Ce rapport fournit des recommandations et des conseils pour appliquer la norme ASME B31.12 d'hydrogène au niveau notamment de la conception des matériaux ; des tests et des vérifications à réaliser.</i> | |
| ASME 2013 | ASME Boiler and Pressure Vessel Code |
| <i>Ce code établit des règles de sécurité concernant la sécurité des équipements sous pression - régissant la conception, la fabrication et l'inspection des chaudières et des récipients sous pression.</i> | |

4.4.1.6 CGA

The Compressed Gas Association (CGA) a édité des guides concernant le transfert, les événements et le stockage d'hydrogène (hydrures métalliques).

| Guide | Nom du guide |
|--|--|
| CGA H-5 2014 | Installation Standard for Bulk Hydrogen Supply Systems |
| <i>Cette norme contient des exigences minimales pour des systèmes d'approvisionnement en hydrogène.</i> | |
| CGA Publication G-5.4 2012 | Standard for Hydrogen Piping Systems At Consumer Sites |
| <i>Cette norme décrit les spécifications et les exigences pour les tuyauteries.</i> | |
| CGA Publication G5.5 2014 | Hydrogen Vent Systems |
| <i>Cette norme présente les lignes directrices de conception des événements et fournit des recommandations pour assurer leur fonctionnement en sécurité.</i> | |
| CGA Publication G-5.6 (EIGA Doc 121/04) 2013 | Hydrogen Pipeline Systems |
| <i>Cette norme a été rédigée conjointement avec l'EIGA et concerne les systèmes de transport et distribution de l'hydrogène.</i> | |
| CGA Publication H-2 2010 | Guidelines for the Classification and Labeling of Hydrogen Storage Systems with Hydrogen Absorbed in Reversible Metal Hydrides |
| <i>Ce document donne des conseils pour la classification, le marquage et traitement des stockages d'hydrures métalliques.</i> | |

4.4.1.7 UL

UL (Underwriters Laboratories) est un organisme émanant de la profession de l'assurance aux Etats-Unis qui crée des normes de sécurité produits. Deux standards ont été rédigés concernant la production d'hydrogène.

| Guide | Nom du guide |
|--|--|
| Outline of Investigation UL Subject 2264B | Gaseous Hydrogen Generation Appliances- Water Reaction |
| <i>Ce document couvre les systèmes intégrés d'hydrogène gazeux désignés comme générateur d'hydrogène. Il s'applique aux générateurs d'hydrogène destinés à une utilisation intérieure et extérieure, commerciale, industrielle et résidentielle. Il contient les exigences en termes de construction, performance, marquage, instructions, tests et vérifications.</i> | |
| Outline of Investigation UL Subject 2264 D | Portable Water Electrolysis Type Hydrogen Generators |
| <i>Ce document couvre les générateurs d'hydrogène portables pour l'installation.</i> | |

4.4.2 CANADA

La norme canadienne CAN/ BNQ 1784-000/ 2007 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.

| Guide/norme | Nom du guide/norme |
|--------------------------------|--|
| CAN/ BNQ 1784-000/ 2007 | Norme canadienne pour les installations d'hydrogène. |

Ce document est actuellement en cours de révision.

4.5 TEXTES SPECIFIQUES POUR L'ASIE

Plusieurs pays en Asie (Chine, Corée et Japon) ont mis en place des guides ou normes spécifiques regroupant les exigences ou recommandations concernant les installations mettant en œuvre l'hydrogène.

4.5.1 TEXTES SPECIFIQUES A LA CHINE

La Chine a édité plusieurs normes pour réglementer les installations contenant de l'hydrogène dont certains référentiels spécifiques à la génération d'hydrogène.

| Guide | Nom du guide |
|---|---|
| GB/T 3634.1 2006 | Hydrogen. <u>Part 1</u> : Industrial hydrogen |
| <i>Cette norme spécifie les exigences pour l'hydrogène utilisé en industrie. Elle décrit les spécifications concernant : les tests/vérifications, l'emballage, le stockage et les exigences de sécurité. Une section concerne le stockage d'hydrogène dont le stockage sous forme d'hydrure, la production par électrolyse.</i> | |
| GB/T 29729-2013 | Essential requirements for the safety of hydrogen systems |
| GB 4962 2008 | Technical safety regulations for gaseous hydrogen use |
| <i>Cette norme spécifie les prescriptions pour l'utilisation, le remplacement, le stockage, la compression, le remplissage, le chargement, le déchargement, la gestion des urgences, du risque d'incendie et les mesures de maîtrise du risque spécifique pour l'hydrogène.</i> | |
| GB 19774-2005 | Specification of water electrolyte for producing hydrogen |
| <i>Cette norme spécifie la terminologie, les définitions, la classification et la nomenclature, les exigences techniques, les essais et les vérifications, les exigences pour les électrolyseurs.</i> | |
| GB/T 29411-2012 | Technical specification of hydrogen-oxygen generator with water electrolyte |

Certains textes tels que GB/T 29729-2013 et GB/T 29411-2012 n'ont pas été décrits dans le tableau ci-dessus par manque d'informations disponibles (problème linguistique).

4.5.2 TEXTES SPECIFIQUES AU JAPON

Le Japon est doté d'un arsenal normatif relativement important dont voici un extrait :

| Sujet | Nom du guide ⁵³ |
|--|--|
| Recommandations sur le matériel | Codes on safety inspections [H, 2014] Simplification on safety design margin review process [H, 2013] Listing of material for pipes [H, -2015] Codes on requirements of listed materials [H, 2015] Codes on composite tanks for high pressure vessels [H, 2013] Relaxing safety design margin [H, 2015] |
| Recommandations sur la production d'hydrogène | Definition of compressor with electrolyzer capability [H, Mar 2014] |
| Recommandations sur le transport d'hydrogène | Relaxing maximum limit of pressure for delivery tank [H, Mar 2014] Labeling on on-board tank [H, Mar 2012] Relaxing upper temp of tank [H, 2014] |

4.5.3 TEXTES SPECIFIQUES A LA COREE DU SUD

La Corée du Sud a édité plusieurs normes pour réglementer les installations d'hydrogène. Ces normes sont la transposition de normes ISO.

| Guide | Nom du guide |
|-----------------------|--|
| KS B ISO 15916 | Basic consideration for the safety of hydrogen systems |
| KS B ISO 16111 | Transportable gas storage devices Hydrogen absorbed in reversible metal hydride |

⁵³ Overview of FC & H2 Development in JAPAN , May 19th, 2014, 21st IPHE Educational Event in Oslo, Norway

4.6 SYNTHÈSE DU CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF

Le cadre réglementaire et normatif fait apparaître un ensemble abondant de normes relatives à l'hydrogène qui tend à s'uniformiser au niveau international, et une réglementation spécifique en fonction des continents voire des pays.

4.6.1 IMPORTANCE DE LA NORMALISATION

La normalisation permet notamment de définir les règles techniques communes entre différents acteurs pour la conception et l'installation de produits et systèmes. Ces règles sont élaborées par des groupes d'experts techniques dans les domaines concernés et rendues disponibles après consultation des différentes parties qu'elles concernent.

Dans le cadre des installations contenant de l'hydrogène, on distingue les normes établies en support aux directives européennes générales relatives à la sécurité telles que les directives machines, ATEX, équipement sous pression, etc. et les normes concernant plus spécifiquement les équipements mettant en œuvre l'hydrogène de manière générale ou les normes liées à des dispositifs spécifiques (stockage, électrolyseur...). Ces dernières normes sont développées par des groupes de travail tels que l'ISO TC 197 à un niveau international.

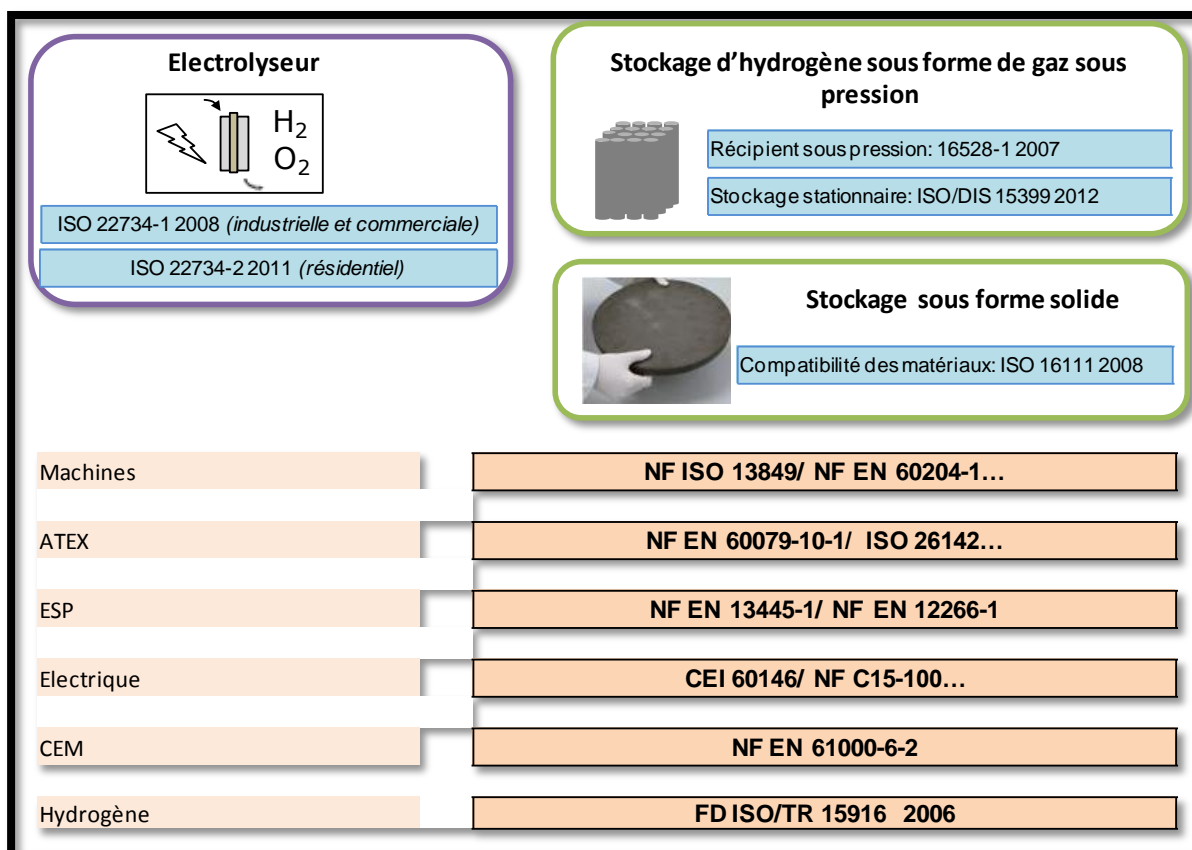


Figure 20 : Synthèse des normes pour les installations d'électrolyse et de stockage

Au niveau français, la norme NF M58-003 a été publiée en décembre 2013. Cette norme se propose, sous la forme d'un guide, de définir un ensemble d'exigences de conception et d'installation à satisfaire pour assurer les conditions de sécurité requises pour des installations mettant en œuvre de l'hydrogène.

4.6.2 UN CADRE NORMATIF ET REGLEMENTAIRE QUI SE MET EN PLACE

La réglementation relative à l'hydrogène se développe actuellement sur trois continents : l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie.

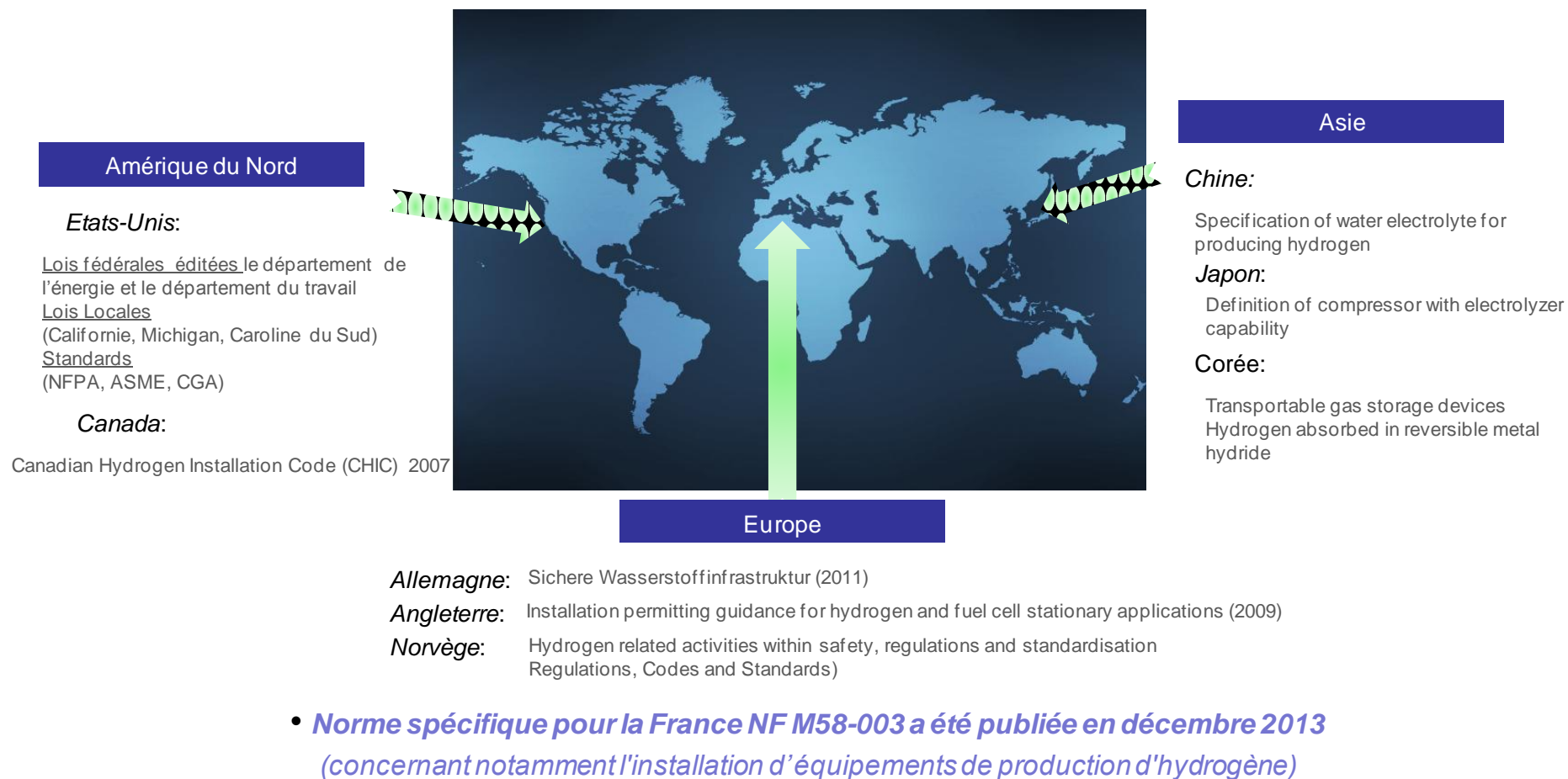


Figure 21 : Synthèse des réglementations et guides

4.6.2.1 CONTEXTE EN EUROPE

En Europe, la réglementation applicable aux installations de production et de stockage hydrogène est principalement issue des directives :

- directives concernant la protection de l'environnement : SEVESO 3, IED et TMD...,
- directives spécifiques à la sécurité des travailleurs : ATEX, Machines, ESP...

Cette réglementation n'est pas spécifique aux installations d'électrolyse.

Pour compléter cette réglementation, l'association européenne des industriels du gaz (EIGA) et certains pays ont ainsi émis des guides ou normes afin de préciser les bonnes pratiques de production et de stockage d'hydrogène.

4.6.2.2 CONTEXTE EN AMERIQUE DU NORD

Au Etats-Unis, le contexte réglementaire et normatif se découpe en trois niveaux : fédéral, local (spécifique à certains états), associatif (par exemple la NFPA).

Au niveau fédéral, les départements de l'Energie et du Travail ont mis en place des réglementations. Ils mettent aussi à disposition un site internet dédié à la réglementation d'installations d'hydrogène et le contrôle par les administrations (<http://www.hydrogen.energy.gov>). Plusieurs Etats (Californie, Michigan et Caroline du Sud) ont également émis leurs propres exigences.

En parallèles, des guides ont été édités par des associations telles que la NFPA, International Fire Code, ASME, CGA. L'un des textes de référence qui ressort est la NFPA 2 spécifique aux technologies hydrogène.

4.6.2.3 CONTEXTE EN ASIE

En Asie, trois pays se distinguent : la Chine, le Japon et la Corée. Ils ont édité de nombreuses normes afin d'harmoniser la conception d'installations produisant ou contenant de l'hydrogène. La Corée du Sud a transposé certaines normes ISO telles que la norme 15916 dans son propre système normatif.

5. PROCESSUS D'AUTORISATION D'EXPLOITER

Les retours des questionnaires envoyés aux industriels et aux experts dans le domaine de l'hydrogène (cf. chapitre 1.1 p 7) ont permis d'obtenir des informations claires sur la réglementation (cf. chapitre 1) et sur les processus d'autorisation en France avec des exemples d'installations. Mais peu d'informations ont été obtenues en dehors de la France. Deux actions ont donc été menées pour obtenir des informations complémentaires :

- une recherche bibliographique sur les processus d'autorisation d'exploiter dans les différents pays de l'Europe,
- l'envoi d'un questionnaire aux administrations concernant l'application de la directive IED.

Ce chapitre synthétise les résultats de ces recherches en trois parties :

- un rappel des processus d'autorisation d'exploiter en France en rappelant les problématiques, les enjeux et les particularités ;
- les processus d'autorisation d'exploiter en Europe avec les exemples de l'Allemagne, la Suède, la Norvège et le Danemark ;
- la mise en application de la directive IED en Allemagne, Autriche, Belgique, Pays-Bas, Danemark.

5.1 PROCESSUS D'AUTORISATION D'EXPLOITER EN FRANCE

5.1.1 RAPPEL SUR LES RUBRIQUES APPLICABLES

En France, les installations pour la fabrication et le stockage d'hydrogène sont concernées par les rubriques suivantes :

| Hydrogène | | | | | | |
|-----------------|------------------------------------|---|-------------------------|----|-------------------------|----|
| Avant juin 2015 | | | | | | |
| Rubriques ICPE | 3420 Fabrication | | 1415 Fabrication | | 1416 Stockage | |
| Seuil | dès la première molécule fabriquée | A | $x \geq 50$ t | AS | $x \geq 50$ t | AS |
| | | | 50 t > x | A | 50 t > $x \geq 1$ t | A |
| | | | | | 1 t > $x \geq 100$ kg | D |
| Après juin 2015 | | | | | | |
| Rubriques ICPE | 3420 Fabrication | | 4715 | | | |
| Seuil | dès la première molécule fabriquée | A | $x \geq 1$ t | | A | |
| | | | 1 t > $x \geq 100$ kg | | DC | |
| | | | Seuil bas | | 5 t | |
| | | | Seuil haut | | 50 t | |

Tableau 19 : Synthèse des rubriques applicables aux installations d'hydrogène avant et après la directive SEVESO 3 (x =quantité d'hydrogène présente dans l'installation)

Pour les installations d'oxygène, la rubrique 1220 a été remplacée par la 4725.

| Oxygène | | |
|------------------------|-----------------------|--------|
| <i>Avant juin 2015</i> | | |
| Rubriques ICPE | 1220 | |
| Seuil | $x \geq 2000t$ | AS |
| | $2000t > x \geq 200t$ | A |
| | $200t > x \geq 2t$ | D |
| <i>Après juin 2015</i> | | |
| Rubriques ICPE | 4725 | |
| Seuil | $x \geq 200t$ | A |
| | $200t > x \geq 2t$ | D |
| | Seuil bas | 200 t |
| | Seuil haut | 2000 t |

Tableau 20 : Synthèse des rubriques spécifique aux installations d'oxygène avant et après la directive SEVESO 3 (x =quantité d'oxygène présente dans l'installation)

Pour le stockage sous forme d'hydrure, la rubrique 1810 a été supprimée puis remplacée par les rubriques 4610, 4620, 4630 et la rubrique 1450 a été conservée.

| Hydrures | | | | | | |
|------------------------|--|---|--|------|-------------------|------|
| <i>Avant juin 2015</i> | | | | | | |
| Rubriques ICPE | 1450 Solides facilement inflammables | | 1810 Fabrication, emploi ou stockage des substances aux préparations réagissant violemment au contact de l'eau | | | |
| Seuil | $x \geq 1t$ | A | $x \geq 500t$ | AS | | |
| | $1t > x \geq 50kg$ | D | $500t > x \geq 100t$ | A | | |
| | | | $100t > x \geq 2t$ | D | | |
| Rubriques ICPE | Solides facilement inflammables | | Réagissant avec eau | | | |
| | 1450 | | 4610/ 4620 | | 4630 | |
| Seuil | $x \geq 1t$ | A | $x \geq 100t$ | A | $x \geq 50t$ | A |
| | $1t > x \geq 50kg$ | D | $100t > x \geq 10t$ | DC | $50t > x \geq 2t$ | DC |
| | - | - | Seuil bas | 100t | Seuil bas | 50t |
| | - | - | Seuil haut | 500t | Seuil haut | 200t |

Tableau 21 : Synthèse des rubriques spécifique au stockage sous forme d'hydrure avant et après la directive SEVESO 3 (x =quantité de substance inflammable présente dans l'installation)

La rubrique 1450 « Solides facilement inflammables » s'applique aux hydrures facilement inflammables, voire pyrophoriques ou qui dégagent des gaz inflammables au contact de l'eau mais pas à l'ensemble des hydrures existants, dont certains sont peu réactifs à l'air ou à l'eau.

En France, la rubrique 3420 mise en place en transposition de la directive IED fait que toute activité de production industrielle d'hydrogène se trouve soumise au régime d'autorisation sans seuil, dès la première molécule d'hydrogène produite. Cette rubrique a été mise en place initialement pour encadrer la production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures et des procédés avec émission de polluants. Cette réglementation semble inadaptée pour la fabrication d'hydrogène par électrolyse qui n'émet pas de polluant.

5.1.2 VERS UNE EVOLUTION REGLEMENTAIRE ?

La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte prévoit à l'article 121 quart la rédaction d'un plan de développement du stockage des énergies renouvelables par hydrogène décarboné. Celui-ci porte notamment sur l'adaptation des réglementations pour permettre le déploiement de ces nouvelles applications de l'hydrogène telles que le « power-to-gas ».

5.1.3 INTERACTION AVEC LE CADRE DE MISE EN ŒUVRE

Les installations d'électrolyse et de stockage présentent des interactions avec plusieurs domaines réglementaires (cf. détail des domaines d'application dans le chapitre 2.6 p 33).

Il a été choisi de détailler le cadre réglementaire ou les prescriptions qui s'appliquent en cas d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel (power-to-gas) ou de présence d'un électrolyseur dans un établissement recevant du public.

5.1.3.1 POWER TO GAS : PRESCRIPTIONS DE CERTAINS ACTEURS ET LIMITES

Actuellement la composition d'un gaz pouvant être injecté dans une canalisation de transport ou de distribution de gaz naturel est fixée par les exploitants de ces canalisations (transporteurs ou distributeurs), dans leurs prescriptions techniques, telles que par exemple :

- prescriptions techniques applicables aux canalisations de transport GRT gaz- juin 2004- version 3-Partie 5.1.2,
- prescription techniques du distributeur GrDF –mars 2009- Partie 5.1.3.

Selon ces prescriptions, le gaz injecté ne doit pas contenir plus de 6% d'hydrogène en proportion molaire.

Cette proportion étant beaucoup plus élevée que celle observée jusqu'à présent dans le gaz naturel qui est véhiculé dans ces réseaux, plusieurs questions se posent quant à l'influence de cette quantité d'hydrogène sur la sécurité des réseaux de gaz naturel, telles que :

- la modification du comportement du mélange et des distances d'effets en cas de fuite ;
- la modification des causes et des fréquences d'accidents sur les réseaux ainsi que de l'efficacité des mesures compensatoires ou encore les probabilités d'inflammation ;
- l'intégrité des réseaux au niveau des tubes et des raccords pour les réseaux existants ;
- l'adaptation technique des installations de gaz et des appareils à gaz (chaudière, appareils de cuisson)

L'INERIS mène des travaux sur ces questions depuis 2014 dans le cadre d'un programme d'appui technique au Ministère de l'Environnement.

En particulier, une revue des réglementations et de l'état de l'art relatifs à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel dans les autres pays européens est également envisagée pour les années à venir.

C'est pourquoi ce sujet spécifique n'est pas traité dans la présente étude.

5.1.3.2 ELECTROLYSEUR DANS DES ETABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC (ERP)

Parmi les types d'ERP, ceux pour lesquels une installation d'électrolyse peut être pertinente sont :

- station-service comprenant un magasin de vente,
- établissement d'enseignement,
- des refuges de montagne...

L'arrêté du 25 juin 1980 portant approbation des dispositions générales du règlement sécurité ne prévoit pas d'interdiction de l'emploi d'hydrogène excepté pour les salles d'exposition.

Pour les établissements d'enseignement, le stockage de gaz doit être effectué à plus de 8 mètres des zones de stockage de matières combustibles et de stationnement de véhicules (article R11).

Le retour d'expériences des industriels décrit que les autorisations pour des installations fixes situées dans des ERP se font par des dérogations de l'autorité administrative compétente qui s'appuie sur les prescriptions des arrêtés types émis pour des installations classées.⁵⁴

⁵⁴ Présentation : l'hydrogène: impact des déploiements sur le règlement ICPE-AREVA- 17 mars 2011

5.2 PROCESSUS D'AUTORISATION D'EXPLOITER DANS DIFFERENTS PAYS

5.2.1 ALLEMAGNE

Processus d'autorisation

En Allemagne, selon le retour au questionnaire et le « Genehmigungslitfadefaden für Wasserstoff-Stationen », la Directive IED a été transposée au travers de la Loi Fédérale sur le Contrôle des Pollutions (Bundesimmissionsschutzgesetz - BImSchG). Ce texte et les ordonnances associées définissent les conditions selon lesquelles une installation est soumise à autorisation. Le processus de demandes d'autorisation d'exploiter dépend, pour les installations mettant en œuvre de l'hydrogène, de la **quantité d'hydrogène présent** sur le site et de **l'existence ou non de production d'hydrogène sur site**.

Deux seuils (haut et bas) sont définis qui amènent à trois régimes :

- Sous le seuil bas (inférieure à 3 tonnes), les installations ne sont pas soumises à un régime d'autorisation ; un permis de construire et le respect de la réglementation relative aux équipements (exemple : Equipement sous Pression) sont requis.
- Au-delà du seuil bas (entre 3 tonnes et 30 tonnes), les installations sont soumises à une **autorisation simplifiée** (proche du régime de l'enregistrement), pour lequel une enquête publique n'est pas requise.
- Au-delà du seuil haut (au-delà de 30 tonnes), les installations sont soumises à une **autorisation avec procédure complète (incluant enquête publique)**. Cette procédure nécessite que la requête soit publiquement accessible pendant un mois (internet ou journaux local et mairie). Toute personne physique peut faire une opposition écrite jusqu'à 14 jours après la fin de la publication. Ensuite il y a une discussion publique entre l'administration, les futurs exploitants, les experts et les opposants pour présenter le projet et en discuter (les journalistes peuvent assister au débat mais ne peuvent pas poser de questions). L'administration doit ensuite donner son avis au plus tard 7 mois après la discussion publique. Il est possible pour une personne physique de s'opposer à un avis favorable. Une deuxième expertise est alors mise en place par l'administration. Uniquement après cette procédure la personne physique peut porter plainte contre le projet.

Le processus d'autorisation simplifié d'une installation (sans enquête publique) est résumé dans le Tableau 22.

| Etape | Activité |
|-------|--|
| 1 | Consultation des autorités compétentes, du bureau de la planification, du conseil de surveillance, de l'inspection des bâtiments et du service incendie. |
| 2 | Collecte des documents associés à la procédure d'autorisation d'exploiter pour que l'ingénieur spécialisé puisse statuer sur la conformité de l'installation vis-à-vis des réglementations techniques. |
| 3 | Finalisation de la demande d'autorisation. |
| 4 | Approbation par le bureau de douane (autorisation pour la distribution d'hydrogène dans le cadre d'une station service). |
| 5 | Emission d'une déclaration par l'ingénieur spécialisé du conseil de surveillance. |
| 6 | Permis de construire établi par l'inspection des bâtiments. |
| 7 | Autorisation par les autorités compétentes. |
| 8 | Construction de l'installation. |
| 9 | Etablissement du document pour examiner l'installation avant le démarrage (plan d'action avec le service incendie et plan d'intervention en matière de sécurité). |
| 10 | Vérification avant le premier démarrage. |
| 11 | Accord pour démarrer l'installation. |
| 12 | Détermination de la durée de validité de l'installation et de ses composants. |
| 13 | Evaluation de la fréquence de contrôle par les autorités compétentes et le conseil de surveillance. |
| 14 | Information sur les périodes d'inspections qui seront soumises à l'autorité de délivrance des permis. |

Tableau 22 : Principales étapes d'un processus d'autorisation d'exploiter pour l'Allemagne

Spécificité pour les installations de production d'hydrogène

Les installations de production d'hydrogène gazeux par transformation chimique à échelle industrielle sont classées d'office en **régime d'autorisation selon la procédure complète**.

Documents requis

La 9^{ème} ordonnance précise les étapes du processus d'autorisation et les documents requis. Si un établissement comporte une partie d'installation dépassant le seuil haut défini ci-dessus, l'étude de sécurité pour cette partie doit être présentée pour obtenir l'autorisation. Ce n'est pas une étude de dangers en tant que telle, mais l'opérateur doit pouvoir démontrer que l'installation est conçue et exploitée selon des règles de l'art. Ceci implique la présentation de plans, de descriptions... L'évaluation des pollutions, bruits, odeurs...est également requise.

Le processus d'autorisation regroupe le **permis environnemental** et le permis de construire. **Le permis de construire** (Baugenehmigungsverfahren) est requis et doit être conforme au règlement de construction en vigueur dans la région où l'on souhaite installer l'installation.

Un autre **texte** concerne **les installations de grande capacité**. Ainsi la 12^{ème} ordonnance transpose la Directive Seveso et définit les exigences pour les établissements Seveso Seuil Haut et Seuil Bas (Störfall-Verordnung).

Enfin, il existe en parallèle **un régime de Contrôle d'équipement**. Pour les équipements soumis, des inspections régulières par un tiers (organisme notifié...) sont requises et la conformité avec les réglementations techniques est à assurer. Les équipements soumis sont ceux listés dans la loi sur la sécurité des produits et l'ordonnance sur la sécurité opérationnelle (Betriebsicherheitsverordnung – BetrSichV), section 1.

Délais d'obtention d'une autorisation

Le retour d'un industriel en Allemagne a permis de préciser les délais moyens d'obtention d'une autorisation selon les installations :

| Réservoir d'hydrogène et électrolyseur | |
|---|----------------|
| Permis de construire <i>Baugesetzbuch – BauGB</i> | environ 2 mois |
| Autorisation complète <i>Bundesimmissionsschutzgesetz – BImSchG</i> | environ 7 mois |
| Exigences de sécurité <i>Betriebsicherheitsverordnung – BetrSichV</i> | |

Autorités responsables de la mise en application des textes

Les autorités responsables de délivrer les permis d'exploiter sont :

- §13 Betriebsicherheitsverordnung: **autorités locales** (Landeskreis),
- §4 Bundes-Immissionsschutzverordnung: **autorités régionales** (Land).

Des organismes privés sont également impliqués dans le processus d'autorisation d'exploiter comme :

- principalement **les organismes de contrôles agréés** (Zugelassene Überwachungsstelle-ZÜS) comme TÜV Rheinland, TÜV SÜD, TÜV Nord,... pour le contrôle de la sécurité de fonctionnement de la station,
- **un ingénieur spécialisé** (Brandschutzsachverständiger) pour la définition et le contrôle de la **sécurité incendie** et les moyens de lutte associés,
- **un ingénieur spécialisé** (Blitzschutzsachverständiger) pour la définition et le contrôle des **mesures de sécurité** concernant le risque foudre.

5.2.2 SUEDE

Processus d'autorisation

Cette partie traite du processus d'autorisation d'exploiter pour la Suède et concerne les bâtiments et les installations mettant en œuvre l'hydrogène et leur exploitation.

Un permis de construire et un permis d'exploitation de gaz inflammables est exigé de la part des autorités locale (municipalité). Avant le début de l'exploitation, une inspection de l'installation est effectuée par les autorités locales. Aucun gaz n'est autorisé à être livré sur l'installation tant qu'une décision écrite n'a pas été rédigée par les autorités locales chargées de la construction.

Si l'emplacement choisi par l'entrepreneur ne rentre pas dans le plan de développement de la municipalité, une procédure plus longue doit être suivie afin d'envisager les modifications possibles du plan.

Après l'autorisation, l'installation est soumise à des inspections périodiques.

Le processus d'autorisation d'une installation est résumé dans le Tableau 23.

| Etape | Activité |
|-------|---|
| 1 | Planification et conception de l'installation. Consultation des autorités locales de construction et du service d'incendie. Contrôle de la conception des équipements sous pression par un organisme notifié. |
| 2 | 1/ Une demande écrite de construction de l'installation est soumise à l'autorité locale de construction. La demande doit être documentée (le plan de l'installation, un schéma d'implantation, les documents de sécurité vis-à-vis du risque d'incendie...) 2/ Une demande écrite pour l'exploitation de gaz inflammables est soumise à l'autorité locale de construction. La demande doit être documentée (la description de l'installation, la quantité de gaz exploitée, le détail des personnes chargées de l'exploitation de l'installation, le plan des zones à risques, un plan reprenant la ventilation et les équipements contenant du gaz, le détail des résistances au feu des murs, une analyse des risques...) et signée par l'opérateur qui interviendra sur l'installation d'hydrogène. |
| 3 | Si la demande pour l'exploitation de gaz inflammables est conforme, le demandeur reçoit une autorisation écrite de l'autorité locale. |
| 4 | L'installation d'hydrogène est construite. Le service incendie doit recevoir une notification par écrit , concernant le responsable nommé et le vice- responsable de l'exploitation de l'installation d'hydrogène. |
| 5 | Inspection de l'installation (équipement sous pression, installation électrique, respect du processus d'exploitation des gaz inflammable, qualité de la construction...). |
| 6 | Si l'inspection est concluante, les autorités remettent un permis d'exploiter et joignent un visa final sur le permis de construire . |

Tableau 23 : Principales étapes d'un processus d'autorisation d'exploiter pour la Suède

Autorités responsables de la mise en application des textes

Les autorités qui suivent l'application des exigences vis-à-vis des électrolyseurs et unités de stockages sont résumées dans le Tableau 24.

| Autorité en suédois | Autorité en français | Abréviation | Site |
|---|--|-------------|--|
| Myndigheten för samhällsskydd och beredskap The Swedish Civil Contingencies Agency | L'agence de protection civile suédoise | MSB | www.msb.se |
| Elsäkerhetsverket The Swedish National Electrical Safety Board | Le bureau national suédois de sécurité électrique | ELSAK | www.elsakerhetsverket.se |
| Arbetsmiljöverket | Autorité de l'environnement de travail | AV | www.av.se |
| Boverket | Le bureau national du logement, de la construction et la planification | BV | www.boverket.se |
| Kommun | Commune (Autorité locale) | | |

Tableau 24 : Autorités de référence en Suède

Le Bureau national du logement, de la construction et de la planification (BV) émet des lois liées à la construction.

La commune est l'autorité responsable de la planification et du permis de construire dans la municipalité.

Les exigences en matière de planification et de construction sont définies par la loi 2011-05-02 SFS 2010: 900. Elles concernent les procédures, les responsabilités et le contrôle relatifs aux permis de construire.

5.2.3 NORVEGE

En Norvège, la législation applicable pour les installations d'hydrogène est issue des directives émises par la commission européenne bien que la Norvège ne soit pas membre de l'Union Européenne.

Processus d'autorisation

Un permis de construire est exigé par les autorités locales (municipalité). Dans certains cas, les autorités locales responsables de la construction peuvent demander au service incendie de la commune des commentaires sur les demandes de permis de construire.

Depuis le 8 Juin 2009, **un permis d'exploiter des gaz inflammables n'est plus requis**. L'autorité responsable du permis de construction vérifie le choix de l'emplacement de l'installation. Avant la mise en application du permis de construire, **les voisins de la future installation doivent être informés**. Ils ont deux semaines après l'information et la mise à disposition des documents pour commenter la demande.

Si l'emplacement choisi par l'entrepreneur ne rentre pas dans le plan de développement de la municipalité, une procédure plus longue doit être suivie afin d'envisager l'accord d'une exemption ou la modification du plan.

Pour avoir l'accord du permis de construire, les entreprises doivent préciser dans la demande les responsables de l'exploitation et les besoins en certification à l'Autorité norvégienne de construction (DBIK). Les exigences de certification sur la compétence professionnelle et le système d'assurance de la qualité ont pour objectif d'évaluer si les entreprises sont aptes à assurer la construction et l'exploitation de l'installation.

L'approbation de la Direction nationale de la protection civile et de la gestion des situations d'urgence (DSB), pour l'exploitation de gaz inflammables, n'est plus requise depuis le 8 Juin 2009. Selon le règlement FOR-2009-06-08 n°602 (concernant l'exploitation de substances inflammables, réactifs ou substances sous pression, et l'équipement et les installations utilisés pour l'exploitation de ces substances), l'approbation a été remplacée par l'obligation d'informer et de fournir certaines informations au DSB suivant certains critères tels que **les volumes stockés d'hydrogène (s'ils dépassent 400 litres** et indépendamment de la pression). L'information doit être enregistrée par voie électronique sur le site web de la DSB et dans un délai raisonnable avant le début de l'opération. Le service incendie local doit recevoir l'avis du DSB concernant les inspections des installations.

Les installations d'hydrogène sont considérées comme présentant des risques importants (la réglementation FOR-2009-06-08 n°602 paragraphe 9). Pour de telles installations, la réglementation impose **l'inspection de l'installation d'hydrogène et de ses équipements** pour vérifier le niveau de sécurité de l'installation. Les contrôles sont effectués par un organisme indépendant accrédité. Le règlement exige également des inspections systématiques à effectuer par un organisme indépendant pour vérifier le maintien de l'installation dans le temps.

Autres exigences spécifiques aux installations d'hydrogène :

- **l'évaluation des risques du site** (§ 14),
- **des plans documentés de gestion des situations d'urgence** (§ 19).

Un organigramme qui reprend les étapes de la procédure administrative relative à la mise en œuvre d'une installation pour la Norvège est joint en annexe 4.

Autorités responsables de la mise en application des textes

Les autorités qui suivent l'application des exigences vis-à-vis des électrolyseurs et unités de stockages sont résumées dans le Tableau 25.

| Autorité en norvégien | Autorité en français | Abréviation | Site |
|--|--|-------------|------------------------|
| Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap | Direction de la protection civile et la gestion des situations d'urgence | DSB | www.dsb.no |
| Direktoratet for arbeidsrilsynet | Autorité norvégienne d'inspection du travail | DAT | www.arbeidstilsynet.no |
| Direktoratet for byggkvalitet | Autorité norvégienne pour la construction | DIBK | www.dibk.no |
| Kommune | Municipalité (autorité locale) | | |

Tableau 25 : Autorités de référence en Norvège

L'autorité norvégienne responsable de la construction (DIBK) émet la réglementation nationale relative à la construction.

La commune est l'autorité responsable de la planification et du permis de construire dans la municipalité.

Les exigences en termes de planification et construction sont régies par la loi sur les bâtiments LOV 2008-06-27 (Plan ob Bygningsloven). Elles concernent les procédures, responsabilités et contrôles spécifiques au permis de construire.

5.2.4 DANEMARK

Processus d'autorisation

Cette partie traite du processus d'autorisation d'exploiter pour le Danemark et concerne les bâtiments, les installations d'hydrogène et leur exploitation.

Un permis de construire et un permis d'exploitation de gaz inflammables sont exigés par les autorités. Les demandes de permis de construire sont traitées par les autorités locales responsables de la construction et les permis d'exploitation pour des installations d'hydrogène sont traités par le service incendie. Le permis de construire nécessite, entre autres, un plan de gestion des situations d'urgence pour l'installation et des distances de sécurité en conformité avec les exigences réglementaires.

Selon certains critères tels que le volume maximum d'hydrogène stocké, un permis supplémentaire peut être nécessaire. Il est géré par l'Agence danoise de gestion des situations d'urgence (DEMA). La réglementation BEK n°1444 et le guide technique pour les gaz, l'incendie et la prévention (Guide No : 15) précise les critères tels que la quantité de gaz inflammables qui conditionne le besoin d'une autorisation des autorités locales et de la DEMO. Le chapitre 1.4 du Guide No : 15 définit des quantités limites et décrit également les informations à fournir dans les demandes de permis.

Le retour d'expérience vis-à-vis de demandes de permis montre que les réunions avec les représentants des autorités locales facilitent le processus d'obtention des permis.

Le processus d'autorisation d'une installation d'hydrogène est résumé en cinq étapes selon le Tableau 26.

| Etape | Activité |
|-------|---|
| 1 | <p>Début du dialogue</p> <ul style="list-style-type: none"> • Première réunion avec les autorités locales pour présenter le projet • Dialogue avec les autorités de la ville impliquée dans des projets similaires |
| 2 | <p>Accord des autorités</p> <ul style="list-style-type: none"> • Présentation d'une demande de permis pour la construction et l'exploitation aux autorités locales et service incendie - potentiellement aussi les autorités nationales • Choix de l'emplacement de l'installation d'hydrogène sur la base de normes de distance de sécurité • Conception de l'installation sur la base de la réglementation et des normes nationales et internationales |
| 3 | <p>Travail sur le site (fondation, alimentation...)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permis de construire accordé par les autorités locales |
| 4 | <p>Installation des équipements (électrolyseurs et unité de stockage)</p> <p>Réalisation des essais de fonctionnement</p> <p>Octroi définitif de l'autorisation d'exploiter</p> |
| 5 | <p>Démarrage de l'installation</p> |

Tableau 26 : Principales étapes d'un processus d'autorisation d'exploiter pour le Danemark

Autorités responsables de la mise en application des textes

Les autorités qui suivent l'application des exigences vis-à-vis des électrolyseurs et unités de stockages sont résumées dans le Tableau 27.

| Autorité en danois | Autorité en français | abréviation | Site |
|----------------------------|--|--------------|--|
| Sikkerhedsstyrelsen | L'autorité danoise responsable de la sécurité des technologies | SIK | www.sik.dk |
| Arbejdstilsynet | L'autorité danoise en charge du travail et de l'environnement | AT | www.arbejdstilsynet.dk |
| Beredskabsstyrelsen | L'agence danoise de gestion des situations d'urgence | DEMA, BRS | www.brs.dk |
| Energistyrelsen | L'agence danoise de l'énergie | ENS | www.ens.dk |
| Erhvervsstyrelsen | L'autorité danoise responsable des affaires | ERST, DBA | www.erhvervsstyrelsen.dk |
| Kommune | Municipalité (autorité locale) | | |

Tableau 27 : Autorités de référence en Norvège

L'agence danoise de l'énergie (ENS) émet des réglementations nationales relatives à la construction, par exemple le " Bygningsreglementet " qui est entré en vigueur le 1^{er} décembre 2010 (BR10). Les sections locales sont les autorités responsables du suivi des projets et des permis de construire. Les exigences en matière de planification et de construction sont définies par la loi LBK n°1185 af 14/10/2010 Bekendtgørelse af byggeloven (Byggeloven).

5.3 ANALYSE COMPAREE DE LA MISE EN APPLICATION DE L'IED DANS DIFFERENTS PAYS DE L'UNION EUROPEENNE

La directive IED (Industrial Emission Directive) est une refonte de la directive 2008/1/CE relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution, dite « directive IPPC » et de six autres directives sectorielles : la directive relative aux grandes installations de combustion (2001/80/CE), la directive sur l'incinération de déchets (2000/76/CE), la directive relative aux émissions de solvants (1999/13/CE) et trois directives relatives à l'industrie du dioxyde de titane (78/176/CEE, 82/883/CEE, 92/112/CEE).

La production d'hydrogène tombe actuellement dans le champ de la directive IED et est considérée comme une production de produit chimique inorganique. La directive s'applique à la production en quantité industrielle⁵⁵, mais ne précise pas cette notion et ne définit pas de seuil. Nous avons consulté, début 2015, les autorités de divers pays (Allemagne, Autriche, Belgique, Pays-Bas, Danemark) sur la base d'un questionnaire afin d'identifier comment cela a été transposé dans leurs pays respectifs.

D'après les informations recueillies, les obligations imposées par la directive IED sont appliquées en Allemagne, en Autriche et aux Pays-Bas avec un régime d'autorisation dès la première molécule d'hydrogène produite.

Au Danemark, une installation, au vue des faibles quantités d'hydrogène stockées et produites, n'a pas été soumise à autorisation. Il n'y a néanmoins pas de seuils établis et les décisions sont prises au cas par cas.

La Belgique comme la France considèrent comme production en quantités industrielles la production utilisée à des fins commerciales. Dès lors, si le produit est destiné au commerce ou comme produit intermédiaire permettant de parvenir à un produit fini destiné à une mise sur le marché, on considère cette production comme une production en quantité industrielle et les exigences de l'IED s'appliquent. La production à des fins académiques ou de recherche n'est pas considérée comme « industrielle ».

Un rectificatif a été apporté (JOUE n° L 158 du 19 juin 2012) à la directive concernant la section 4. Industrie chimique

« Aux fins de la présente partie, la production, pour les catégories d'activités répertoriées dans cette partie, désigne la production en quantité industrielle par transformation chimique ou biologique des substances ou groupes de substances énumérés aux points 4.1 à 4.6 ».

6. CONCLUSION

Dans le cadre de sa mission de service publique de l'état, l'INERIS réalise, pour divers secteurs d'activité, des études comparatives des réglementations, des guides professionnels et des normes applicables dans d'autres pays.

L'hydrogène est un vecteur d'énergie dont l'utilisation est une possible réponse aux enjeux pour la lutte contre le réchauffement climatique. Ceci implique notamment de développer des infrastructures pour faciliter la production. Dans le cadre de la réflexion sur une éventuelle réglementation française spécifique aux électrolyseurs, l'INERIS s'est vu confié la réalisation d'une étude comparative.

Cette étude concerne la réglementation en relation avec l'électrolyse dans d'autres pays et poursuit les objectifs suivants :

- **dresser un panorama des installations (technologies employées, quantités et capacités mises en œuvre), de leurs utilisations (équilibre réseau d'électricité, injection dans le réseau de gaz naturel...) et de leur potentiel de déploiement ;**
- **identifier les risques associés à ces installations et les principales fonctions de sécurité associées ;**
- **déterminer le cadre supra national (directive européenne) pouvant conduire à des obligations réglementaires en France et dans les états membres ;**
- **identifier les textes de référence (réglementations, guides ou normes) applicables aux électrolyseurs et aux stockages d'hydrogène ;**
- **distinguer les différents processus d'autorisation de ces installations.**

Cette étude couvrait les installations suivantes :

- les différentes technologies d'électrolyseur,
- les différents types de stockages de l'hydrogène (stockage sous forme de gaz sous pression et stockage sous forme d'hydrure).

Elle a été réalisée à partir d'une analyse des documents issus d'une étude bibliographique et d'informations collectées au cours d'une enquête réalisée au près de fournisseurs, d'installateurs, d'autorités de contrôle et d'experts de ces installations de production et stockage hydrogène.

Les résultats de cette enquête ont fait ressortir 3 types de technologies d'électrolyseurs : électrolyseurs alcalins, PEM et SOEC qui sont à des degrés de maturité différents.

Pour le stockage, deux technologies ressortent : le stockage d'hydrogène à haute pression qui est une technologie bien connue, simple à mettre en œuvre et le stockage des hydrures qui permet à basse pression d'atteindre de bons rapports entre quantité stockée et le volume mais présente un coût élevé et est encore peu commercialisé.

Concernant les technologies de production d'hydrogène une étude de l'accidentologie et des analyses de risques réalisées par l'INERIS dans le cadre d'un projet avec l'ADEME⁵⁶ a permis d'identifier trois principaux événements redoutés :

- la fuite d'hydrogène,
- le mélange d'hydrogène et oxygène à l'intérieure de l'installation,
- la réaction des hydrures avec l'oxygène ou l'humidité.

Quant aux mesures de maîtrise des risques à adopter pour faire face à ces scénarios, les points qui ressortent de cette première analyse sont les suivants :

- les mesures de maîtrise des risques techniques applicables à ces installations sont connues et issues, pour la plupart, de l'expérience des gaziers ;
- elles sont, au besoin, complétées de mesures spécifiques aux environnements naturels et humains particuliers dans lesquels peuvent être exploitées ces installations (cf. chapitre 3.3.4) ;
- une vigilance est à conserver vis-à-vis du transfert des installations vers les utilisateurs (formation et information) qui ne sont pas issus de l'industrie gazière (installations implantées dans des stations-service ou d'autres ERP, systèmes isolés ...) ;
- une attention est à porter à la fiabilité des systèmes instrumentés de sécurité, en particulier, pour les systèmes qui peuvent fonctionner en autonomie (système isolé) en utilisant des automates de conduite ;
- les phases d'arrêt (entre deux démarrages, arrêts d'urgence...) et de démarrage sont à définir clairement au niveau de la gestion des gaz.

Cette étude a permis de faire ressortir un cadre normatif abondant et actuellement en évolution. Il s'articule autour de normes internationales telles que les normes ISO 22734 pour les électrolyseurs et la norme ISO 16111 pour les hydrures mais également de normes nationales telles que la norme française NF M 58-003 concernant l'Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène. Il n'y a pas d'obligation réglementaire à appliquer ces normes à l'heure actuelle mais celles-ci pourraient être sollicitées dans de futurs textes au niveau national ou européen. Une première étude comparative des mesures de maîtrise issues des normes a été réalisée et est présentée en partie 3.3.

Au niveau de la réglementation européenne, des directives ayant des portées larges, non spécifiques aux installations mettant en œuvre de l'hydrogène s'appliquent. Il s'agit par exemple des directives concernant la protection de l'environnement (SEVESO III, IED...) ou des travailleurs (ATEX, machines, ESP....).

Concernant la transposition de la directive IED, les industriels s'interrogent sur la pertinence de l'application de l'actuelle rubrique 3420 pour les électrolyseurs, du fait que toute activité de production se trouve soumise au régime d'autorisation sans seuil, dès que la première molécule d'hydrogène est produite.

Il ressort pourtant de l'étude que, globalement, nos homologues européens appliquent un régime d'autorisation dès la première molécule d'hydrogène produite, exceptées, la France et la Belgique où la notion de production en quantité industrielle est interprétée comme production en vue de commercialisation.

⁵⁶ Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène, ADEME, ISBN : 979-10-297-0131-3, (2015)

7. LISTE DES ANNEXES

| Repère | Désignation | Nombre de pages |
|---------------|---|------------------------|
| 1 | Retours d'expériences sur des installations mettant en œuvre de l'hydrogène | 9 |
| 2 | ISO TC197 Comité de Normalisation internationale des technologies hydrogène | 1 |
| 3 | Normes générales s'appliquant aux électrolyseurs | 3 |
| 4 | Processus d'autorisation en Norvège (anglais) | 1 |
| 5 | Glossaire et définition | 1 |

ANNEXE 1

RETOURS D'EXPERIENCES SUR DES INSTALLATIONS D'HYDROGENE

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|----------------|-------|------------------|--------------|---|------------------------------|--|---|--|---|
| USA | 1980 | Site industriel | Canalisation | Explosion et feu dans un espace confiné | Fuite à l'air | Corrosion | Une fuite sur une tuyauterie de 3,5" (A106 GRADE B PIPE) enterrée, due à de la corrosion créant un orifice de 2". La tuyauterie était âgée de 15 ans. La fuite conduit à une accumulation d'H2 dans un bâtiment puis à une explosion et un feu. | Dégât de 5,9M€, destruction de deux bâtiments. | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=282&cat=2&val=17 |
| France | 1989 | Site industriel | Canalisation | Feu | Fuite à l'air | Défaillance vanne ou humaine (opération) | Une fuite d'hydrogène sous 300 bar et à 300 °C se produit lors du débouchage d'un circuit alors que 6 employés démontent une bride pleine et ouvrent une vanne de purge. La fuite est due à une vanne d'isolement défailante ou à une fausse manœuvre en amont. | A la suite de l'inflammation spontanée du jet, 4 employés sont tués et 3 autres sont brûlés plus ou moins grièvement. L'incendie est limité et rapidement circonscrit. | ARIA 170 |
| France | 1988 | Site industriel | Canalisation | RAS | Fuite à l'air | Rupture de canalisation | Une canalisation sur un stockage d'hydrogène (240 m³) se rompt. | Le personnel est évacué et un périmètre de protection est mis en place. | ARIA 275 |
| Irlande | 1989 | Site industriel | Canalisation | Feu | Fuite à l'air | Fissure sur tuyauterie | Une fissure sur une tuyauterie entre deux conteneurs entraîne une fuite de 280 kg d'hydrogène qui s'enflamme immédiatement. | L'accident ne fait que des dégâts limités. | ARIA 1089 |
| France | 1990 | Site industriel | Canalisation | Feu | Fuite à l'air | Rupture de joint | Un incendie se déclare sur l'unité de méthanation (95% H2 + 5% CO --> CH4 + H2 + H2O) d'un vapocraqueur. Une rupture de joint sur une bride du circuit est à l'origine de l'accident. | Aucune victime n'est à déplorer. | ARIA 2174 |
| France | 1993 | Site industriel | Canalisation | Feu | Fuite à l'air | <i>Donnée indisponible</i> | Un fuite d'hydrogène se produit sur une canalisation de 50 mm reliée à un réacteur et s'enflamme spontanément au contact de l'oxygène de l'air. | A la suite de la fermeture des vannes, la quantité d'hydrogène relâchée est limitée au volume du réacteur. | ARIA 4799 |
| USA | 2000 | Site industriel | Canalisation | Feu | <i>Données indisponibles</i> | <i>Donnée indisponible</i> | Une canalisation d'usine transportant de l'hydrogène prend feu dans une raffinerie. | Un employé est blessé et la voie express située à proximité est coupée pendant 90 min. L'employé blessé a été soigné sur place pour des blessures mineures. Les équipes de secours internes et externes au site maîtrisent l'incendie au bout de 2h30. | ARIA 18179 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|------|---------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|---|--|--|---|
| USA | 2002 | Site industriel | Canalisation | Feu et explosion | Fuite à l'air | Rupture de canalisation | La rupture d'une canalisation en galerie entraîne une émission d'hydrogène qui provoque un incendie et plusieurs petites explosions. | Aucune victime n'est à déplorer. Le sinistre est circonscrit en 5 min. Des investigations sont menées pour connaître les causes de cette rupture. | ARIA 23731 |
| USA | 2008 | Site industriel | Canalisation | Explosion et feu | Fuite à l'air | Défaillance humaine (opération) | Opération de maintenance sur un électrolyseur suite à une fuite au niveau d'un capteur de pression. L'opérateur a uniquement coupé la ligne mais pas purgé la ligne avec un gaz inerte. | RAS | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=232 |
| USA | 2007 | Station H2 | Canalisation | RAS | Fuite à l'air | Défaillance d'un équipement (raccord de tuyauterie) | Fuite identifiée par un bruit de sifflement audible sur un raccord de 0,25" servis à 700 bar. Le raccord était déjà en service depuis 1 an. La cause est la défaillance de l'équipement. | RAS | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=194&cat=3&val=11 |
| USA | 2012 | Station H2 | Canalisation | Feu torche | Fuite à l'air | Soupape non compatible | Une soupape de décharge de pression dans un réservoir de stockage d'hydrogène n'a pas fonctionné. Une fuite au niveau de la vanne a entraîné le démarrage d'un feu. | L'incident a conduit à l'évacuation préventive de plusieurs entreprises environnantes et une école secondaire à proximité par les autorités locales. | http://www.fuelcelltoday.com/analysis/analysis-views/2012/12-07-18-perceptions-of-hydrogen-fuelling-safety |
| USA | Donnée indisponible | Laboratoire | Canalisation | Feu | Fuite à l'air | Défaillance humaine (maintenance) | Un technicien soudait un câble suspendu au-dessus d'une ligne de H2 en acier inoxydable. Au cours du processus de soudage, deux trous ont été créés accidentellement sur la tuyauterie d'hydrogène. | L'opérateur a entendu un bruit de sifflement et a fermé le robinet, mais l'hydrogène avait déjà enflammé et brûlé sa main alors qu'il se sentait pour une fuite. | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=149 |
| USA | 2001 | Site industriel | Electrolyseur alcalin | Explosions et feux torches | Mélange H2/O2 dans le système | Combinaison de sources : obstruction des canalisations d'alimentation en eau et défaillance capteurs due à défaillance électrique | L'obstruction des canalisations d'alimentation en eau provoque un niveau bas d'électrolyte et une augmentation de l'O2 dans H2. Ce phénomène combiné à une défaillance de l'analyseur O2 dans H2 due à une défaillance du système électrique (transformateur de séparation) conduit à un mélange explosif dans le réservoir d'H2 basse pression. | Projection des débris jusque à 20 mètres. | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=129&cat=2&val=12 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|------|-----------|------------------|----------------------------|-----------------|---------------|--|---|---------------------------|---|
| NC | 1996-1998 | NC | Electrolyseur alcalin | Explosion | Mélange H2/O2 | Problème sur le système d'égalisation des pressions au niveau des stacks | NC | NC | Questionnaire posé aux fournisseurs d'installations en février et mars 2015 |
| NC | 1999 | NC | Electrolyseur alcalin | NC | Mélange H2/O2 | Défaut au niveau des soudures | Soudures pas adaptées au fonctionnement en atmosphère alcalin et déchirure de la membrane | NC | Questionnaire posé aux fournisseurs d'installations en février et mars 2015 |
| NC | 2001 | NC | Electrolyseur alcalin | NC | Mélange H2/O2 | Mauvaise étanchéité d'une membrane | NC | NC | Questionnaire posé aux fournisseurs d'installations en février et mars 2015 |
| NC | 2005 | NC | Electrolyseur (redresseur) | Feu | NC | Incendie électrique | NC | NC | Questionnaire posé aux fournisseurs d'installations en février et mars 2015 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|------------------|-------|----------------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|--|---|--|------------|
| Allemagne | 1993 | Site industriel | Compresseur | Explosion | Mélange H2/O2 dans le système | Evènement externe causant la fonte d'un fusible et une série d'évènements en cascade | Des travaux sur le réseau électrique d'une unité de production d'hydrogène provoquent la fonte d'un fusible, entraînant la fermeture d'une vanne d'arrêt montée sur les collecteurs des compresseurs à piston, à la sortie d'une cloche de gazomètre (ce dispositif permet d'augmenter la pression de l'hydrogène issu de l'électrolyse de 50 mbar à 250 bar). La cloche du gazomètre se remplit d'hydrogène jusqu'au niveau maximal puis la vanne de régulation du réservoir se ferme. Une dépression se produit alors dans la conduite d'aspiration du compresseur mis hors service par le dispositif de sécurité. Une entrée d'air dans les compresseurs à haute pression forme un mélange explosif avec l'hydrogène à l'origine de l'explosion. | Le contrôleur de l'unité situé dans le bâtiment annexe est grièvement blessé par la projection d'un morceau de fer. Le bâtiment de stockage, 2 compresseurs, les conduites et autres composantes de l'unité sont détruits. | ARIA 19325 |
| France | 1991 | Site industriel | Compresseurs | Feu | Fuite à l'air | Défaillance bride | Une fuite d'un mélange hydrogène-azote se produit sur une bride d'aspiration d'un compresseur. | Les dommages restent limités au bâtiment du compresseur. | ARIA 3001 |
| USA | 1979 | <i>Donnée indisponible</i> | Compresseurs | Explosion | Mélange H2/O2 dans le système | Infiltration d'air dans le système | Une explosion se produit sur un compresseur d'hydrogène du fait d'une entrée d'air. | Les projectiles émis endommagent un réservoir d'ammoniac dont une partie du contenu s'échappe. Trois personnes sont blessées. | ARIA 14870 |
| Inde | 1999 | Site industriel | Compresseurs | Explosion | <i>Donnée indisponible</i> | <i>Donnée indisponible</i> | Un incendie soudain se déclare dans l'unité d'hydrocraquage de la raffinerie tôt le matin, au niveau du compresseur d'hydrogène. | Les équipes de secours internes interviennent et le feu est maîtrisé en quelques minutes. L'incendie a causé la mort de 5 personnes. | ARIA 15808 |
| USA | 2001 | Site industriel | Compresseurs | Explosion | Fuite à l'air | <i>Donnée indisponible</i> | L'origine de l'accident résiderait dans une fuite au niveau d'un compresseur d'hydrogène. Le nuage aurait ensuite explosé. | Les employés sont blessés et hospitalisés. Les pompiers maîtrisent le sinistre en 10 à 15 min. | ARIA 21760 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|--------------|-------|------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------|---|--|---|---|
| USA | 2006 | Laboratoire | Compresseur et stockage | Feu à l'extérieur | Fuite à l'air | Défaillance d'un équipement (clapet anti-retour) | Un dysfonctionnement du clapet anti-retour du compresseur conduit à l'augmentation de la pression dans la section entre le compresseur et les bouteilles. Lorsque la pression atteint le niveau maximum autorisé (275 bar), le disque de rupture de la vanne de sécurité se rompt et l'hydrogène est relâché à l'air. | Un feu torche d'une courte durée est constaté au niveau de l'évent lors de la rupture du disque de rupture. | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=253&cat=2&val=17 |
| USA | 2010 | Site industriel | Echangeur | Explosion | Fuite à l'air | Attaque par l'hydrogène à haute température | Lors du redémarrage d'échangeurs, deux fuites ont été signalées. Les opérations ont continué car il était prévu que les fuites s'arrêtent à l'atteinte des températures nominales. En poursuivant les opérations, un des échangeurs a rompu au niveau d'un raccord soudé en créant un important dégagement d'hydrogène et naphta. L'autoinflammation du nuage a mené à la formation d'une importante boule de feu. | Sept opérateurs sont morts par la suite de leurs blessures. | http://www.csb.gov/tesoro-refinery-fatal-explosion-and-fire/ |
| Japon | 1989 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Explosion et feu | Fuite à l'air | Corrosion | La fuite serait due à une corrosion par enrichissement du fluide en chlorure à cause d'un dépôt de sulfure de fer. Une explosion s'est déclarée et a provoqué un incendie. | 3 blessés légers sont à déplorer. | ARIA 106 |
| Japon | 1992 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Explosion et feu | Fuite à l'air | Défaillance humaine (maintenance) et équipement (bague) | Une bague fileté de 1,42 m, de diamètre, déformée désassemblage d'un joint et par les cycles thermiques, est projetée à plus 100m. L'hydrogène et le fuel sont éjectés et explosent immédiatement. Le feu se déclare dans l'unité. | 10 morts et 7 blessés parmi les opérateurs. 130MF de dégâts. | ARIA 1792 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|-----------|---------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|
| Allemagne | 1994 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Feu | Fuite à l'air | Défaillance équipement | Pendant la phase de chauffage dans l'échangeur de chaleur de produit gazeux, un mélange de produit gazeux s'échappe à l'air libre à la suite d'un défaut d'étanchéité de la conduite. La mauvaise étanchéité serait due à un défaut de matériau. | Dommages matériels estimés à 1 million de marks (destruction partielle des équipements). | ARIA 18569 |
| Allemagne | 1997 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Feu | Fuite à l'air | Défaillance équipement (conception) | Une fuite se produit et s'enflamme au niveau d'un joint situé sur un échangeur. Ces événements sont imputables à une anomalie de conception. (choix du joint). | Dommages matériel | ARIA 23140 |
| NC | 1991 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Flamme | Fuite à l'air | Défaillance humaine (maintenance) | Lors du redémarrage et lors de la phase de montée en pression, l'opérateur entend un sifflement. Il se dirige vers la source et voit une flamme. Il exécute une manœuvre d'isolement pour stopper la flamme. Une bride mal remontée sur l'échangeur, après la visite, serait à l'origine de l'incident. | Calorifuge endommagé. | ARIA 26615 |
| NC | 1971 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Feu | Fuite à l'air | Défaillance humaine (maintenance) | Un incendie se produit sur les joints d'échangeurs chargés d'effluents (hydrocarbure et hydrogène). L'accident serait dû à un mauvais serrage des tiges filetées. | Dommages du matériel. | ARIA 26616 |
| France | 2006 | Site industriel (raffinerie) | Echangeur | Feu | Fuite à l'air | Défaillance humaine (maintenance) | Une fuite d'un mélange hydrogène et hydrocarbures s'enflamme au niveau du joint situé entre le fond et le corps d'un échangeur. L'analyse des causes révèle une défaillance du joint monté, différent du joint préconisé. | 4 semaines d'arrêt de l'unité sinistrée. | ARIA 32145 |
| USA | Donnée indisponible | Site industriel | Bouteille de stockage | Détonation dans le réservoir | Mélange H2/O2 dans le système | Défaillance humaine (maintenance) | Une mauvaise manipulation sur une tuyauterie multiple collectant plusieurs gaz dont de l'H2 et de l'O2 conduit à un mélange H2/O2 dans le réservoir (conçu pour 90 MPa) et donne lieu à une détonation. | Rupture du réservoir et projection des fragments jusque à 425 m (fragment du 20 kg). | http://h2tools.org/lessons/incident.asp?inc=135&cat=2&val=17 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|--------|-------|------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|---|---|------------|
| France | 1988 | Site industriel | Bouteille de stockage | Feu torche | Fuite à l'air | Cause externe (foudre) | Une fuite enflammée d'hydrogène (H2) se produit sur une semi-remorque raccordée à un poste de détente. La foudre serait à l'origine de l'accident. | Les secours externes arrivant sur site 15 min plus tard constatent une fuite très importante de gaz enflammé à l'arrière de la semi-remorque, à proximité de la réserve de bouteilles verticales. Les premières mesures consistent à refroidir par noyage les têtes de bouteilles de la semi-remorque sinistrée et à faire évacuer les autres semi-remorques. | ARIA 343 |
| France | 1988 | Site industriel | Bouteille de stockage | Explosion | Explosion mécanique | Rupture mécanique | Un réservoir de 3 000 l d'hydrogène gazeux datant de 1939 (L=14 m, diam.=570 mm) explose à 135 bar. Une expertise conclue à une rupture différée (fatigue statique) du réservoir par fragilisation de l'acier sous l'effet de l'hydrogène. | Il n'y a pas de victime. Des dommages matériels internes et externes sont observés jusqu'à 500 m dans l'axe du stockage, la majorité étant localisés dans un rayon de 350 m : bris de bardages et toitures en fibrociment des ateliers exposés, de vitres et de vitrines de magasin, déplacement de tuiles. | ARIA 437 |
| France | 1991 | Site industriel | Bouteille de stockage | Explosion | Fuite à l'air | Corrosion | Une fuite sur un réservoir de 100 m ³ contenant 370 kg d'hydrogène provoque une explosion. Une corrosion par fatigue est à l'origine de la fuite qui a provoqué l'explosion. Le fréquent remplissage du stockage n'a fait qu'accélérer le processus de fragilisation du réservoir. | L'onde de pression engendrée cause d'importants dommages aux bâtiments extérieurs (vitres brisées, départ de feux) ; un fragment du réservoir est retrouvé à plusieurs centaines de mètres du lieu de l'explosion. Le bilan humain fait état de 23 personnes du public légèrement blessées. | ARIA 2903 |
| France | 1998 | Site industriel | Bouteille de stockage | <i>Donnée indisponible</i> | Fuite à l'air | Corrosion | Dans un stockage d'hydrogène constitué de cylindres horizontaux sur leur remorque de transport, un écrou de raccord de canalisation à la vanne d'un récipient se rompt et 5000 m ³ de gaz s'échappent. Une expertise montre que le métal (laiton) a subi une corrosion sous tension. Tous les autres écrous semblables sont changés. | <i>Donnée indisponible</i> | ARIA 13574 |

| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|---------------|-------|------------------|-----------------------|------------------|---------------------|---------------------------------|---|---|------------|
| France | 1987 | Site industriel | Bouteille de stockage | RAS | Fuite à l'air | Défaillance batterie de secours | A la suite d'une coupure électrique, la défaillance d'une batterie de secours provoque le déclenchement d'alarmes dans un dépôt d'hydrogène. Une soupape située sur un circuit de purge s'ouvre et 30 m ³ d'hydrogène sont rejetés à l'atmosphère. | RAS | ARIA 15757 |
| USA | 2002 | Site industriel | Bouteille de stockage | Explosion et feu | Fuite à l'air | Défaillance mécanique | Une fuite d'hydrogène provenant d'un réservoir explose et forme une boule de feu. Selon les premiers éléments de l'enquête, la cause de l'accident serait purement mécanique. | Une des 4 unités génératrices de courant qui composent le site (800 MW chacune) est endommagée, mais aucun blessé n'est à déplorer. Plusieurs dizaines de pompiers se rendent sur place munis de gros équipements. La situation est maîtrisée en moins d'une heure. | ARIA 23111 |
| USA | 2006 | Site industriel | Bouteille de stockage | RAS | Suppression système | Défaillance soupape | Une émission accidentelle d'hydrogène au niveau d'une soupape nécessite une intervention d'urgence pour abaisser la pression de 140 à 0 bars dans un réservoir. | La police interdit la circulation routière aux alentours du site jusqu'à la fin de l'intervention des équipes de l'usine en présence des pompiers. L'incident n'a pas eu de conséquence humaine et n'a pas nécessité d'évacuation. | ARIA 31936 |

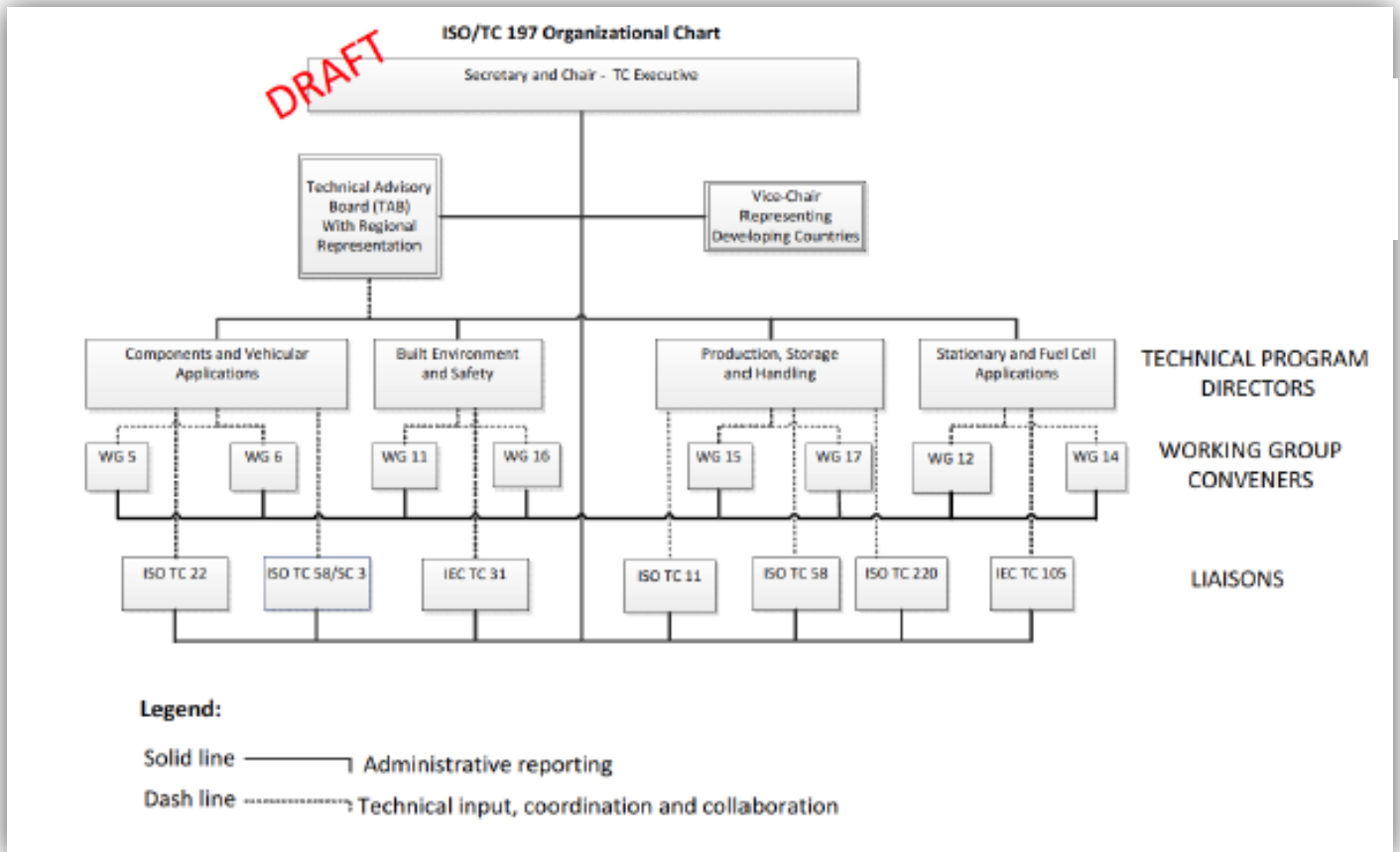
| Pays | Année | Entité impliquée | Equipement | Type d'accident | Phénomène | Cause de l'accident | Description et cause détaillée de l'accident | Conséquence de l'accident | Source |
|--------|-------|------------------|---|------------------|---|---|---|--|---|
| France | 2013 | Site industriel | Presse pour compacter des mélanges d'hydrure de magnésium | Explosion et feu | Poudre d'hydrure de magnésium suspendu dans l'air | Fuite d'air dans chambre de pastillage | <p>Une explosion et un départ de feu se produisent vers 8h50 lors du remontage après maintenance d'une presse utilisée pour compacter des mélanges d'hydrure de magnésium (MgH₂) et de graphite naturel pour former des pastilles ; C'est probablement une explosion de poussières d'hydrure de magnésium et/ou d'hydrogène dans le confinement de la chambre de pastillage. Les employés maîtrisent les flammes dans le carter de la pompe à vide et à la sortie du sas de la presse, avant l'arrivée des pompiers. Lors de la fabrication des pastilles, des poussières sont générées dans l'enceinte à vide et s'accumulent dans diverses zones de la presse (soufflets, face avant et arrière de la presse, tiroir, dévêtisseur, intérieur du sas et du répartiteur). Pour éviter une accumulation trop importante de poudre, la presse est nettoyée à chaque changement de poste, soit 3 fois par jour. L'explosion a eu lieu après le nettoyage de la presse, lorsque les employés ont mis sous vide la cavité de pressage préalablement à sa mise sous argon. L'hydrogène proviendrait de sa désorption à température ambiante à partir de la poudre d'hydrure de magnésium, phénomène favorisé par l'humidité de l'air. Une défaillance du réseau de vide après fermeture des portes de la presse aurait conduit à la mise en suspension du mélange de poudre. Le nuage formé, confiné, se serait enflammé spontanément à la suite d'une entrée d'air. X</p> | 3 employés sont blessés, l'un est légèrement brûlé, les 2 autres présentent des troubles auditifs. Les dégâts matériels concernent la proximité immédiate de l'équipement : portes avant et arrière de la presse arrachées et projetées ; visserie de la porte avant du sas arrachée et porte arrière arrachée et projetée ; passerelle de la presse endommagée ; trappe de visite du répartiteur servant à homogénéiser la poudre dans la chambre de broyage, projetée ; carter du filtre de la pompe à vide ayant explosé. La paroi de l'atelier derrière la presse et l'éclairage sont endommagés ainsi que des vannes et des tuyauteries mais la structure du bâtiment est intacte. Les 16 employés sont en chômage technique le temps d'identifier l'origine et les circonstances du sinistre. La ligne de production de pastilles est arrêtée pour plusieurs mois. Plusieurs organismes spécialisés en sécurité industrielle et entreprises expertes en matières explosives ou hydrogène sont sollicités et la décision de construire une extension de l'atelier est repoussée. Plusieurs organismes spécialisés en sécurité industrielle et entreprises expertes en matières explosives ou hydrogène sont sollicités et la décision de construire une extension de l'atelier est repoussée. | ARIA 43573 |
| NC | NC | ERP | Stockage d'hydrure | Fuite | Fuite à l'air sur les réservoirs au niveau des vannes | Manipulation inadaptée de l'utilisateur | Méconnaissance des risques liés à l'hydrogène | NC | Questionnaire posé aux fournisseurs d'installations en février et mars 2015 |
| France | NC | Site industriel | Stockage d'hydrure | Fuite | Fuite à l'air sur un réservoir d'hydrure | Problème d'étanchéité sur un nanomètre | 500 litres d'hydrogène relargués en 1 semaine | Stockage non confiné | Questionnaire posé aux fournisseurs d'installations en février et mars 2015 |

ANNEXE 2

ISO TC 197 : COMITE DE NORMALISATION INTERNATIONALE DES TECHNOLOGIES HYDROGENE

Le TC 197 est le comité de l'ISO qui a en charge les travaux de normalisation liés à l'hydrogène. L'ISO TC 197 a pour objectif de développer des normes internationales pour les systèmes et des dispositifs de production, stockage, transport, mesure et utilisation de l'hydrogène.

Ce comité était divisé en plusieurs groupes de travail à sa création. Le diagramme ci-dessous résume les activités des différents groupes de travail.



Ce comité publie ou révisé des normes telles que:

| | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> ISO 22734-1:2008 Hydrogen generators using water electrolysis process – Industrial and commercial applications – <u>Proposal for revision pending</u> <input type="checkbox"/> ISO 22734-1:2011 Hydrogen generators using water electrolysis process – Residential applications <input type="checkbox"/> ISO 16110-1:2007 Hydrogen generators using fuel processing technologies – Safety <input type="checkbox"/> ISO 16110-2:2009 Hydrogen generators using fuel processing technologies – Test methods for performance | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> ISO/PDTR 15916:2014 Basic considerations for safety of hydrogen systems (WG16) Publication imminent <ul style="list-style-type: none"> ❖ Will replace the original ISO/TR 15916:2004 <input type="checkbox"/> ISO/WD 19883 Safety of pressure swing adsorption system for hydrogen separation and purification (WG17) <input type="checkbox"/> ISO/CD 19884 Gaseous hydrogen – Cylinders and tubes for stationary storage (WG15) <input type="checkbox"/> ISO 16111:2008 Transportable gas storage devices – Hydrogen absorbed in reverse metal hydride – <u>NWIP for revision submitted</u> |
|---|--|

ANNEXE 3

NORMES GENERALES S'APPLIQUANT AUX ELECTROLYSEURS

Les composants et dispositifs de protection électrique doivent être adéquats en fonction de leurs utilisations prévues et conformes aux normes internationales de CEI (tableau issu de la norme ISO : 22734-1) :

| Type d'équipement électrique | | Normes internationales |
|--|---|--|
| Catégorie principale | Équipement spécifique | |
| Disjoncteurs | | CEI 60947-2 |
| Interrupteurs, sectionneurs, interrupteurs-sectionneurs et combinés-fusibles | | CEI 60947-3 |
| Contacteurs et démarreurs de moteur | Contacteurs et démarreurs électromécaniques | CEI 60947-4-1 |
| | Graduateurs et démarreurs à semi-conducteurs de moteurs à courant alternatif | CEI 60947-4-2 |
| | Graduateurs et contacteurs à semi-conducteurs pour charges, autres que des moteurs, à courant alternatif | CEI 60947-4-3 |
| Appareils et éléments de commutation pour circuits de commande | Appareils électromécaniques pour circuits de commande | CEI 60947-5-1 |
| | Détecteurs de proximité | CEI 60947-5-2 |
| | Dispositifs de détection de proximité à comportement défini dans des conditions de défaut | CEI 60947-5-3 |
| | Appareil d'arrêt d'urgence électrique à accrochage mécanique | CEI 60947-5-5 |
| Équipement à fonctions multiples | Équipement à connexion de transfert | CEI 60947-6-1 |
| | Appareils de connexion de commande de protection (APC) | CEI 60947-6-2 |
| Équipement accessoires | Blocs de jonction pour conducteurs en cuivre | CEI 60947-7-1 |
| | Blocs de jonction conducteurs de protection pour conducteurs en cuivre | CEI 60947-7-2 |
| Ensembles d'appareillage à basse tension | Ensembles de série et ensembles dérivés de série | CEI 60439-1 |
| | Canalisations préfabriquées | CEI 60439-2 |
| | Ensembles d'appareillage BT destinés à être installés en des lieux accessibles à des personnes non qualifiées pendant leur utilisation – Tableaux de réparation | CEI 60439-3 |
| | Ensembles pour réseaux de distribution publics – Enceintes des câbles de distribution pour les réseaux d'énergie électrique | CEI 60439-5 |
| Convertisseurs à semi-conducteurs | | CEI 60146 (toutes les parties) |
| Machines électriques tournantes (moteurs) | | CEI 60034-1 |
| Dispositifs d'alimentation | | CEI 61204 et CEI 61204-6 |
| Blocs d'alimentation à découpage | | CEI 61558-2-17 |
| Transformateurs de puissance: incluant les transformateurs de séparation, les transformateurs de contrôle, les transformateurs d'isolement, les transformateurs de tension constante et les autotransformateurs. | | CEI 61558 (toutes les parties applicables) |
| Dispositifs à semi-conducteurs | | CEI 60747 (toutes les parties applicables) |

Concernant les stations-service, la référence normative ISO/TS 20100 2008 est actuellement en cours de révision à travers le groupe de travail 24 de l'ISO/TC 197. La dernière version de la révision « Draft ISO WDTR19880-1 V10 » de mai 2015 spécifie que les électrolyseurs doivent suivre les exigences de l'ISO 22734-1. La partie 4.9 propose des distances de sécurité pour séparer un potentiel de danger d'un élément (humain, équipement ou environnement).

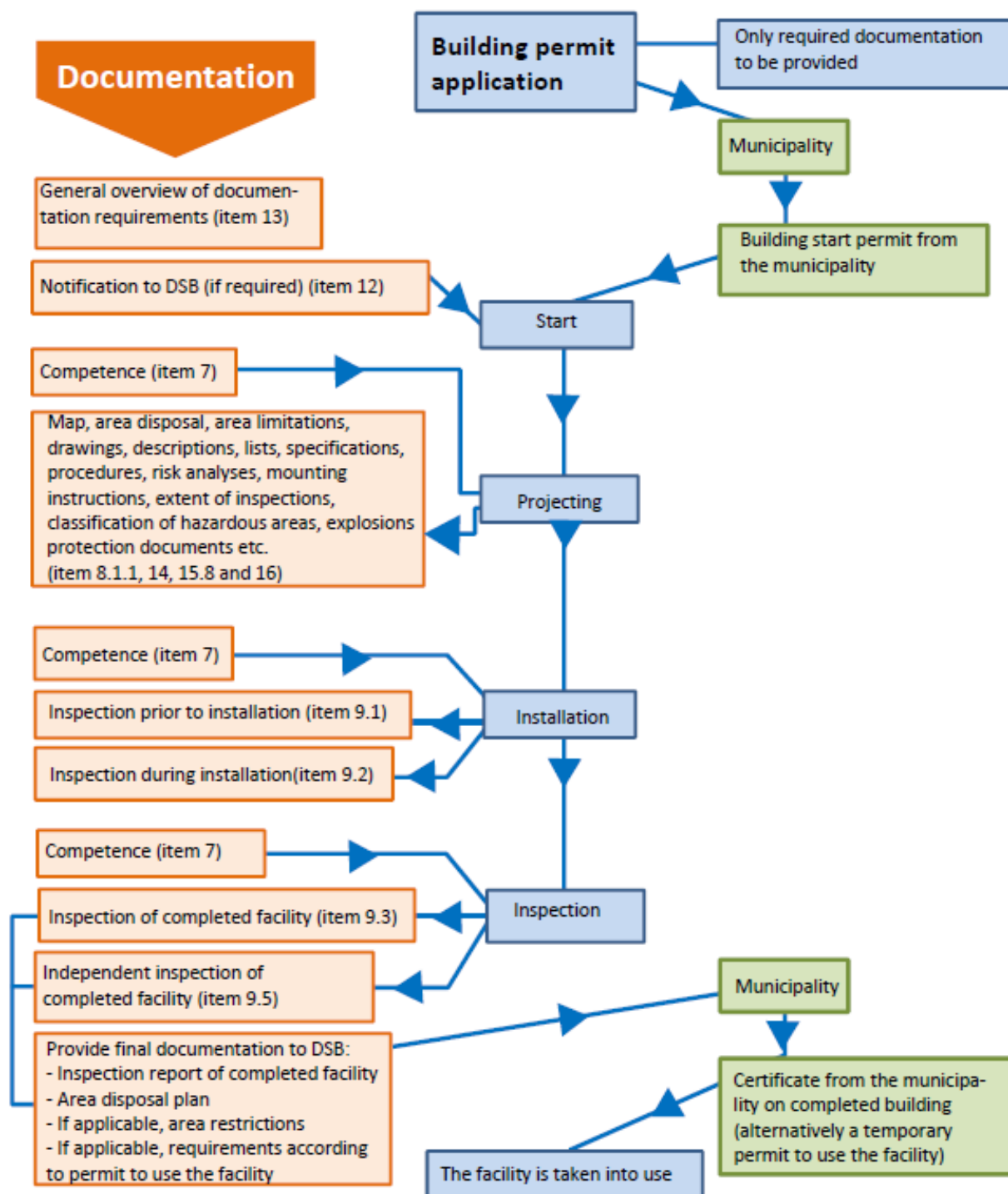
Des normes définissant des mesures génériques sont également à prendre en compte bien qu'elles ne soient pas spécifiques aux électrolyseurs.

| Norme | Nom de la Norme |
|-----------------------------------|---|
| Machines | |
| NF EN ISO 13849-1 2008 | Sécurité des machines Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité <u>Partie 1</u> : principes généraux de conception |
| NF EN 60204-1 2006 | Sécurité des machines Équipement électrique des machines <u>Partie 1</u> : règles générales |
| NF EN 61511 2005 | Sécurité fonctionnelle Systèmes instrumentés de sécurité |
| NF EN ISO 13850 2008 | Sécurité des machines Arrêt d'urgence - Principes de conception |
| Atmosphères explosives | |
| NF EN 60079-0 2010 | Atmosphères explosives <u>Partie 0</u> : matériel - Exigences générales |
| NF EN 60079-10-1 2009 | Atmosphères explosives <u>Partie 10-1</u> : classement des emplacements - Atmosphères explosives gazeuses - |
| ISO 26142 2010 | Détecteurs d'hydrogène Applications fixes |
| NF EN 14986 2007 | Conception des ventilateurs pour les atmosphères explosibles |
| NF EN 14797 2007 | Dispositifs de décharge d'explosion |
| Équipement Sous Pression | |
| NF EN 13445-3 | Réceptacles sous pression non soumis à la flamme |

| Norme | Nom de la Norme |
|--|---|
| 2014 | <u>Partie 3</u> : conception |
| NF EN 13445-5 2014 | Réceptacles sous pression non soumis à la flamme <u>Partie 5</u> : inspection et contrôles |
| NF EN 12266-1 2012 | Robinetterie industrielle - Essais des appareils de robinetterie métalliques <u>Partie 1</u> : essais sous pression, procédures d'essai et critères d'acceptation - Prescriptions obligatoires |
| NF EN 10216-1 2014 | Tubes sans soudure en acier pour service sous pression - Conditions techniques de livraison <u>Partie 1</u> : tubes en acier non allié avec caractéristiques spécifiées à température ambiante |
| NF EN 13480-5 2012 | Tuyauteries industrielles métalliques <u>Partie 5</u> : inspection et contrôle |
| NF EN 13480-6 2012 | Tuyauteries industrielles métalliques <u>Partie 6</u> : exigences complémentaires relatives aux tuyauteries enterrées |
| Installation électrique | |
| NF C15-100 2013 | Installations électriques à basse tension |
| Compatibilité électromagnétique | |
| NF EN 61000-6-2 2006 | Compatibilité électromagnétique (CEM) <u>Partie 6-2</u> : normes génériques Immunité pour les environnements industriels |
| NF EN 61000-6-4 2007 | Compatibilité électromagnétique (CEM) <u>Partie 6-4</u> : normes génériques Norme sur l'émission pour les environnements industriels |

ANNEXE 4

PROCESSUS D'AUTORISATION EN NORVEGE



Note: The flow chart above, replicates the flow chart according to Appendix 1 in the "Guideline concerning the use of dangerous substances, Part 1 Facilities which consumes liquid and gaseous fuels" issued by DSB. Items referred to above, are items according to this Guideline.

ANNEXE 5

GLOSSAIRE ET DEFINITION

GLOSSAIRE ET DEFINITION

| | |
|----------------------------|--|
| AFHYPAC | Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible |
| Electrolyseur | Système produisant de l'hydrogène (et de l'oxygène) par dissociation de constituants de l'eau sous l'effet d'un courant électrique |
| ERP | Etablissement recevant du public |
| Hydrure métalliques | Composé dans lequel l'hydrogène est absorbé dans un réseau métallique |
| IED | Directive relative aux émissions industrielles |
| ISO | Organisation internationale de normalisation |
| Membrane | Matériau séparant l'oxygène et l'hydrogène gazeux produits, tout en permettant le transport des ions dans la cellule |
| NFPA | National Fire Protection Association (US) |
| OHSA | The Occupational Safety and Health Administration (département du travail-US) |
| PCS | Pouvoir Calorifique Supérieur |
| PEM | Proton Exchange Membrane |
| Réformeur | Système produisant de l'hydrogène par dissociation de molécules carbonées |
| SOEC | Solid Oxide Electrolyzer Cell |
| Stack | Empilement de cellules, cœur de la réaction de la production d'hydrogène par électrolyse |
| ATEX | Atmosphère explosive |



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Aiaia
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>