Programme européen de formation des formateurs pour les intervenants

Cours 5

Sécurité de l'hydrogène liquide

NIVEAU I

Pompier

Les informations contenues dans ce cours sont destinées au niveau de pompier et plus.

Ce sujet est également disponible pour les niveaux II et IV.

Ce cours fait partie d'un ensemble de supports de formation comprenant des supports de niveaux I à IV : commandant d'équipe, commandant d'incidents et officier spécialisé. Veuillez consulter l'introduction du cours concernant les compétences et les attentes relatives aux prérequis.

Remarque : ces documents sont la propriété du Consortium HyResponder et doivent être mentionnés en conséquence. Les résultats du projet Européen PRESLHY ont été utilisés comme base.

Co-funded by the European Union

Clause de non-responsabilité

Malgré le soin apporté à la préparation de ce document, la clause de non-responsabilité suivante s'applique : les informations contenues dans ce document sont fournies telles quelles et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. L'utilisateur utilise ces informations à ses seuls risques et périls.

Le document ne reflète que le point de vue de ses auteurs. La FCH JU et l'Union européenne ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

Remerciements

Le projet a reçu un financement de Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) dans le cadre de la convention de subvention n° 875089. Le JU bénéficie du soutien du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne et des pays suivants : Royaume-Uni, France, Autriche, Belgique, Espagne, Allemagne, Italie, République tchèque, Suisse, Norvège. Le livrable 6.1 – Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety – of Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY) project (grant agreement number 779613) est également reconnu.

Résumé

Pour diverses applications de l'hydrogène où l'espace disponible est limité, l'hydrogène liquide (LH_2) est nécessaire pour réduire le volume. Cependant, il existe également d'autres situations où l'état liquide représente une solution raisonnable et économique pour le stockage et la distribution de grandes quantités d'hydrogène, en fonction des exigences de l'utilisateur final. En outre, le LH_2 présente l'avantage d'être extrêmement propre, ce qui le rend approprié dans de nombreuses applications industrielles. L'inconvénient majeur est l'énorme apport d'énergie nécessaire pour liquéfier l'hydrogène gazeux ce qui a un impact significatif sur les coûts d'utilisation du LH_2.

Les dangers associés à la présence et au fonctionnement des systèmes contenant LH_2 font l'objet d'évaluations de la sécurité et des risques. Une partie essentielle de ces analyses de séquences d'accidents est la simulation des phénomènes physiques qui se produisent en relation avec le rejet par inadvertance de LH_2 dans l'environnement par des modèles de calcul. Le comportement de la propagation et de la vaporisation du bassin cryogénique sur un sol liquide ou solide, ainsi que la combustion potentielle du bassin, sont principalement bien compris. En outre, des modèles informatiques de pointe ont été développés et validés par rapport aux données expérimentales respectives. Il reste cependant des questions ouvertes qui nécessitent des efforts supplémentaires afin d'étendre la base de données expérimentales encore insuffisante.

Ce cours s'appuit sur le livrable 6.1 – Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety – of Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY) project. L'étude expérimentale et théorique des caractéristiques de l'hydrogène liquide, de ses propriétés favorables et défavorables, ainsi que les leçons tirées des accidents ont conduit à un ensemble de codes, de normes, de réglementations et de directives, qui ont permis d'atteindre le ~~haut~~ niveau de sécurité actuel. Cela s'applique à la fois à la production de LH_2 et aux méthodes de stockage et de transport/distribution mobiles ou stationnaires de LH_2 , ainsi qu'à son application dans le domaine scientifique et industriel.

Mots clés

Hydrogène liquide, rejet cryogénique, déversement accidentel, combustion, technologie de l'hydrogène liquide

Table des matières

Résumé 3
Mots clés 3
1. Public visé 5
1.1 Description du rôle : Pompier 5
1.2 Niveau de compétence : Pompier 5
1.3 Prérequis : Pompier 5
2. Introduction et objectifs 5
3. Propriétés de l'hydrogène liquide 6
3.1 Propriétés physiques 6
3.2 Propriétés chimiques 7
4. Dangers de l'hydrogène liquide 8
4.1 Problèmes physiologiques liés à l'hydrogène cryogénique 9
4.2 Allumage immédiat d'un rejet de LH_2 pressurisé 10
5. Technologie de l'hydrogène liquide 10
5.1 Procédé et infrastructures de production d'hydrogène liquide 10
5.2 Stockage et transport de l'hydrogène liquide 10
5.2.1 Stockage de l'hydrogène liquide 10
5.2.2 Cryostat pour applications stationnaires 12
5.3 Station de ravitaillement en hydrogène liquide 12
5.3.1 Autobus 16
6. Dangers de l'hydrogène liquide et risques associés pour les intervenants 16
Références 17

1. Public visé

Les informations contenues dans ce cours sont destinées au NIVEAU 1 : pompier. Des cours sont également disponibles aux niveaux II, III et IV : commandant d'équipe, commandant d'intervention et officier spécialisé.

La description du rôle, le niveau de compétence et les attentes d'apprentissage supposés au niveau de pompier sont décrits ci-dessous.

1.1 Description du rôle : Pompier

Un pompier est responsable et doit être capable d'effectuer des opérations en toute sécurité avec des équipements de protection individuel, y compris un appareil respiratoire, en utilisant l'équipement fourni, comme des véhicules, des échelles, des lances à incendie, des extincteurs, des outils de communication et de sauvetage, dans toutes les conditions climatiques dans des zones et dans des situations d'urgence dont on peut raisonnablement prévoir qu'elles nécessitent une intervention.

1.2 Niveau de compétence : Pompier

Formés à l'utilisation sûre et correcte des EPI, des ARI et des autres équipements qu'ils sont censés utiliser, les premiers intervenants doivent être soutenus par des connaissances et des pratiques appropriées. Les comportements qui assureront leur sécurité et celle de leurs collègues doivent être décrits dans des procédures opérationnelles normalisées (PON). La capacité pratique d'évaluer et d'adapter rapidement son comportement face aux risques pour sa propre sécurité et celle des autres est requise.

1.3 Prérequis : Pompier

CEC [1] de niveau 2 : Connaissance factuelle de base d'un domaine de travail ou d'étude. Compétences cognitives et pratiques de base requises pour utiliser les informations pertinentes afin d'effectuer des tâches et de résoudre des problèmes courants en utilisant des règles et des outils simples : travailler ou étudier sous supervision avec une certaine autonomie.

2. Introduction et objectifs

L'utilisation d'hydrogène liquide (LH_2) dans des applications pratiques présente un grand intérêt en raison de la densité énergétique supérieure du LH_2 par rapport à celle de l'hydrogène gazeux comprimé (cGH_2). Le LH_2 est généralement utilisé comme une forme concentrée de stockage de l'hydrogène. Comme pour tout gaz, son stockage sous forme liquide prend moins de place que son stockage sous forme gazeuse. La densité du LH_2 n'est que de 70,8 $kg.m^{-3}$ à la pression et à la température d'ébullition standard (1 atm, 20,3 K). Le LH_2 nécessite une technologie de stockage cryogénique, comme des réservoirs spéciaux dotés d'une super-isolation, et exige une manipulation particulière commune à tous les combustibles

[1] Cadre Européen des Certifications (CEC), ou European Qualifications Framework (EQF)

cryogéniques, ce qui entraîne des risques potentiels pour la production, le transport et l'utilisation du LH_2.

L'objectif de ce cours est de fournir aux intervenants des connaissances suffisantes et de présenter les dangers potentiels du LH_2, en aidant les intervenants à comprendre les propriétés et le comportement du LH_2 :

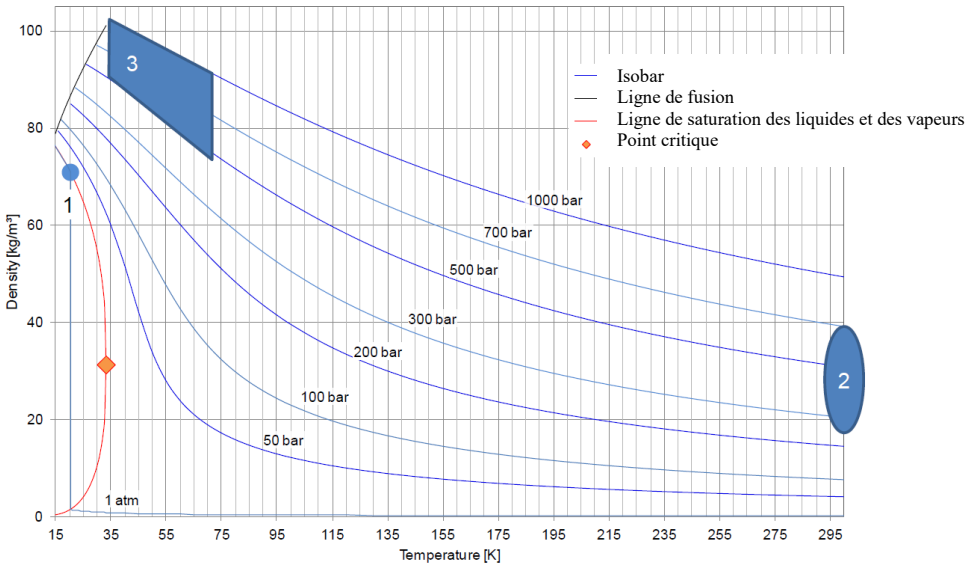
À la fin de ce cours, les intervenants seront en mesure de :

- Comprendre les propriétés, en termes physiques et chimiques, du LH_2,
- Connaître les dangers de l'hydrogène cryogénique,
- Reconnaître le dégagement et la combustion de l'hydrogène cryogénique et les risques thermiques et de pression,
- Connaître les technologies de génération, de stockage et de transport de LH_2,
- Identifier les risques et les dangers de la LH_2 pertinents pour les intervenants.

3. Propriétés de l'hydrogène liquide

3.1 Propriétés physiques

L'hydrogène liquide (LH_2) est l'état liquide de l'élément hydrogène. Pour exister à l'état liquide, l'hydrogène doit être refroidi en dessous de son point critique de 33 K. Cependant, pour qu'il soit entièrement liquide à la pression atmosphérique, l'hydrogène doit être refroidi à 20,28 K (- 252,87 °C) [1]. Le point triple de l'hydrogène se situe à 13,81 K [1] et 7,042 kPa [2]. L'hydrogène liquide a également une énergie spécifique beaucoup plus élevée que l'essence, le gaz naturel ou le diesel. L'hydrogène liquide est généralement utilisé comme une forme concentrée de stockage de l'hydrogène. Comme pour tout gaz, son stockage à l'état liquide prend moins de place que son stockage à l'état gazeux à température et pression normales. Toutefois, la densité de l'hydrogène liquide est très faible par rapport aux autres carburants courants. Une fois liquéfié, il peut être maintenu sous forme liquide dans des conteneurs pressurisés et thermiquement isolés. La densité de l'hydrogène liquide n'est que de 70,99 g/L (à 20 K), soit une densité relative de seulement 0,07 (Figure 1). La densité d'énergie massique de l'hydrogène est très élevée ; 1 kg d'hydrogène contient environ 2,5 fois plus d'énergie que 1 kg de gaz naturel. Bien que l'énergie spécifique soit plus de deux fois supérieure à celle des autres combustibles, cela lui confère une densité énergétique volumétrique remarquablement faible, plusieurs fois inférieure. Les principales propriétés de LH_2 sont résumées dans le tTableau 1.



1 - liquide @ ~20 K ; 2 - gaz pressurisé @ ~300 K ; 3 - gaz comprimé cryogénique

Figure 1 Densité de l'hydrogène dans le domaine des basses températures en fonction de la pression [3].

3.2 Propriétés chimiques

L'hydrogène est capable de réagir chimiquement avec la plupart des autres éléments. En contact avec de l'oxygène, l'hydrogène est hautement inflammable dans une large gamme de concentrations. Il brûle dans une flamme chaude non lumineuse et se transforme en vapeur d'eau, libérant l'énergie liée chimiquement sous forme de chaleur (chaleur brute de combustion : 286 kJ/mol). Un mélange stœchiométrique hydrogène-air contient 29,5 % en volume d'hydrogène. La plage d'inflammabilité est de 4 à 75 % en volume de concentration dans l'air, jusqu'à 95 % en volume dans l'oxygène pur, et s'élargit avec l'augmentation des températures. La limite inférieure d'explosivité (LIE), qui correspond à la quantité minimale de combustible permettant la combustion, est généralement la limite la plus importante pour les rejets à faible débit, car elle sera atteinte en premier dans une fuite continue. Plus important encore, le nuage avec une concentration d'hydrogène > 4 % peut couvrir de plus grandes distances et une plus grande surface à partir du point de rejet.

Une faible étincelle ou la décharge électrostatique d'un corps humain, qui est de l'ordre de 10 mJ, suffirait pour une inflammation ; ceci reste sensiblement du même ordre de grandeur que pour les des autres gaz combustibles. L'énergie minimale d'inflammation diminue encore plus avec l'augmentation de la température, de la pression ou de la teneur en oxygène. Des mesures à des températures cryogéniques ont été fournies récemment [6].

4. Dangers de l'hydrogène liquide

L'hydrogène liquide nécessite une technologie de stockage cryogénique, telle que des réservoirs spéciaux dotés d'une super-isolation thermique, et exige une manipulation spéciale commune à tous les combustibles cryogéniques. Cette situation est similaire à celle de l'oxygène liquide tout en étant plus contraignante. Même avec des réservoirs dotés d'une super-isolation thermique, il est difficile de maintenir une température aussi basse dans le temps, et l'hydrogène s'échappe progressivement. Il partage également bon nombre des mêmes problèmes de sécurité que les autres formes d'hydrogène, et il est suffisamment froid pour liquéfier, voire solidifier l'oxygène atmosphérique, ce qui peut présenter un risque d'explosion.

Afin de définir les différents scénarios dangereux et les conséquences associées, seul le stockage de LH_2 est considéré. Le Tableau 1 résume ces événements, avec les causes initiales et les conséquences finales potentielles.

Tableau 1 Description des événements dangereux potentiels.

Événements redoutés	Conditions principales	Conséquences
1 - Eclatement du stockage à la pression de service (P_W) (impact d'un feu / fragment)	100% H gazeux$_2$ - 10 bar - récipient de type I	Surpression et fragments
2 - Événement accidentel lors du stockage avec du LH_2 (cas d'incendie) à $2P_W$	Rafale de LH_2 stockage Feu éclair	"BLEVE" avec effets thermiques
3 - Défaut sur le stockage (brèche ou perforation)	10 bar, liquide rapide H_2 épandage et évaporation sur le sol	Vaporisation en piscine et formation de nuages cryogéniques avec effets de surpression en cas d'inflammation d'un nuage inflammable
4 - Fuite sur la tuyauterie entre le stockage et la pompe	10 bar, liquide * rejet diphasique sous pression * et/ou H_2 flaque de liquide, vaporisation formant un nuage inflammable	Jet d'hydrogène liquide et pluie potentielle formant une flaque de LH_2 au sol et accompagné d'effets de surpression dus à l'inflammation d'un mélange inflammable
5 - Fuite sur le tuyau entre la pompe et le évaporateur atmosphérique.	1000 bar, liquide * dégagement pressurisé diphasique mais se comportant comme un jet gazeux à haute pression	Comportement certain des jets haute pression quasi gazeux avec effets de surpression dus à l'allumage
6 - Eclatement du stockage à la pression d'éclatement (P_R)	100% gazeux - 10 bar, type I	Surpression et fragments

Note : BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. *Le BLEVE peut être défini comme une vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique.*

En ce qui concerne les scénarios précédemment résumés, on peut souligner que certains d'entre eux sont spécifiques à l'hydrogène liquide, et d'autres sont des événements redoutés relatifs à l'hydrogène gazeux sont déjà décrits, ou similaires.

4.1 Problèmes physiologiques liés à l'hydrogène cryogénique

L'hydrogène est classé comme non toxique et non acide, non cancérigène, étant un simple asphyxiant sans valeur limite de seuil (TLV) ou valeur LD 50 (dose létale 50 %) établie [7].

La vaporisation de l'hydrogène liquide libéré affecte la composition de l'atmosphère, en particulier dans les zones (partiellement) confinées, entraînant un risque d'anoxie. L'énorme rapport d'expansion entre la phase liquide et la phase gaz à température ambiante, combiné à la condensation de l'O_2 de l'air ambiant et à la combustion des mélanges inflammables H_2 -air, entraîne une dilution importante de l'atmosphère locale. La NASA considère qu'une fraction volumique d'oxygène inférieure à 19,5 % est dangereuse pour l'homme ; une fraction inférieure à 8 % est mortelle en quelques minutes (Tableau 2). Les niveaux d'alarme sont généralement fixés à 19 % d'oxygène.

Tableau 2 Impact sur l'homme d'une atmosphère dont la teneur en oxygène diminue.

Teneur en oxygène dans l'air (%)	**Symptômes**
~21 - 19	Aucun
~19 - 15	Réduction des temps de réaction, sans effets visibles
~15 - 12	Respiration lourde, rythme cardiaque rapide, troubles de l'attention ou de la coordination.
~12 - 10	Vertiges, erreurs de jugement, mauvaise coordination musculaire, fatigue rapide, lèvres légèrement bleutées.
~10 - 8	Nausées, vomissements, incapacité de bouger, perte de conscience suivie de la mort.
~8 - 6	Lésion cérébrale après 4-8 min, décès dans les 8 min.
< 6	Coma après 40 s, insuffisance respiratoire, décès

Le contact direct avec l'hydrogène liquide ou avec des surfaces à très basse température provoque des brûlures cryogéniques similaires aux brûlures thermiques. Les tissus vivants gèlent sauf si la période de contact est très brève et lorsque la différence de température entre le cryogène et la peau est encore élevée (régime d'ébullition de film) et le transfert de chaleur faible. La congélation de la peau sur une surface froide peut entraîner de graves lésions lors de son retrait. Une exposition prolongée de la peau à l'hydrogène froid peut entraîner des gelures. Un symptôme est une douleur locale de courte durée. Les tissus gelés sont indolores et apparaissent cireux, avec une couleur blanchâtre ou jaunâtre pâle. La décongélation des tissus gelés peut provoquer une douleur intense. Un choc thermique peut également se produire.

L'inhalation prolongée de vapeur ou de gaz froid peut provoquer de graves lésions pulmonaires. Les yeux, en particulier, sont sensibles au froid. Une exposition prolongée à des températures froides après un déversement important fait baisser la température du corps, entraînant une hypothermie, un dysfonctionnement des organes et une dépression respiratoire [5].

Le rejet accidentel d'hydrogène liquide ne présente pas danger direct significatif pour l'environnement en raison de son caractère non toxique.

4.2 Allumage immédiat d'un rejet de LH_2 pressurisé

L'allumage immédiat d'un jet de LH_2 pressurisé semble être similaire à celui d'un jet haute pression d'hydrogène gazeux, avec des effets de surpression dus à l'allumage.

5. Technologie de l'hydrogène liquide

5.1 Procédé et infrastructures de production d'hydrogène liquide

L'un des défis à relever pour construire une économie de l'hydrogène est la mise en place d'une infrastructure de production et d'approvisionnement efficace. La distribution à grande échelle favorise la phase liquide relativement dense LH_2, mais la liquéfaction souffre toujours de faibles rendements énergétiques. Historiquement, le LH_2 était principalement utilisé comme carburant pour fusées, où la faible efficacité de la production n'avait pas d'importance. Un important programme de liquéfaction de l'hydrogène a été lancé aux États-Unis dans le cadre des programmes spatiaux, ce qui a conduit à la conception et à la construction d'usines de liquéfaction à grande échelle.

5.2 Stockage et transport de l'hydrogène liquide

5.2.1 Stockage de l'hydrogène liquide

Les stockages d'hydrogène liquide existent déjà depuis longtemps pour les professionnels. Mais jusqu'à présent, il n'existe pas de stockage d'hydrogène liquide dans le domaine public. Les réservoirs de stockage de LH_2 peuvent contenir plus d'hydrogène que ceux de GH_2 :la capacité volumétrique des réservoirs de LH_2 est de 0,070 kg/L contre 0,030 kg/L pour GH_2 à 70 MPa. Cependant, une quantité importante d'énergie (environ 30 % de l'énergie contenue dans l'hydrogène) est nécessaire pour la liquéfaction. L'hydrogène peut être liquéfié pour un transport ou un stockage simplifié. Tous les grands fournisseurs de gaz industriels disposent de camions-citernes de livraison cryogénique. LH_2 est utilisé dans les stations de ravitaillement en hydrogène et dans les applications de l'espace aérien.

Les principaux composants du réservoir LH_2 embarqué sont présentés sur la Figure 2. Ils comprennent :

- Réservoir de stockage LH_2,
- Dispositifs d'arrêt,
- Un système de gestion de la pression à cause de l'évaporation,

- Dispositifs de décompression activés par la chaleur ou thermofusible (TPRD),
- Soupapes de sécurité,
- Port de pompage équipé d'un clapet,
- La tuyauterie d'interconnexion (le cas échéant) et les raccords entre les composants susmentionnés.

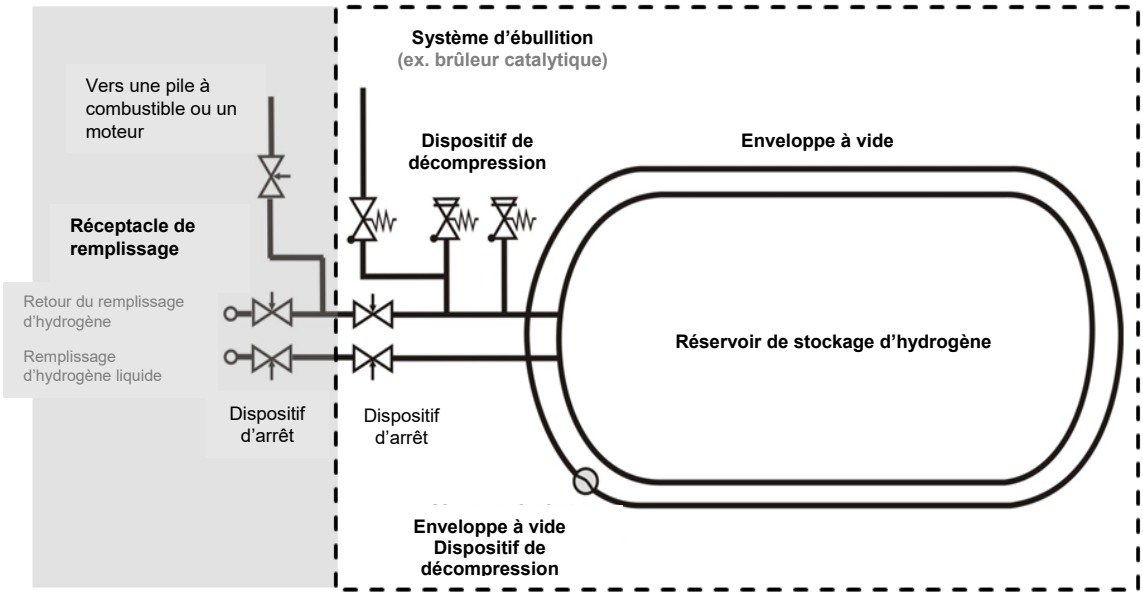


Figure 2 Représentation schématique du système de stockage LH_2 d'après Ref. [8]

Ces stockages peuvent être en position verticale ou horizontale. Les stockages fixes cryogéniques ont un volume de 10 m^3 à 300 m^3 avec une pression interne d'environ 12 bars.

Figure 3 Stockages horizontaux et verticaux d'hydrogène liquide. (Source Air Liquide).

Dans la plupart des cas, les stockages LH2 sont aériens. Néanmoins, il existe quelques cas de stockages souterrains LH_2, enterrés ou en cavité comme illustré et défini dans la Figure 4.

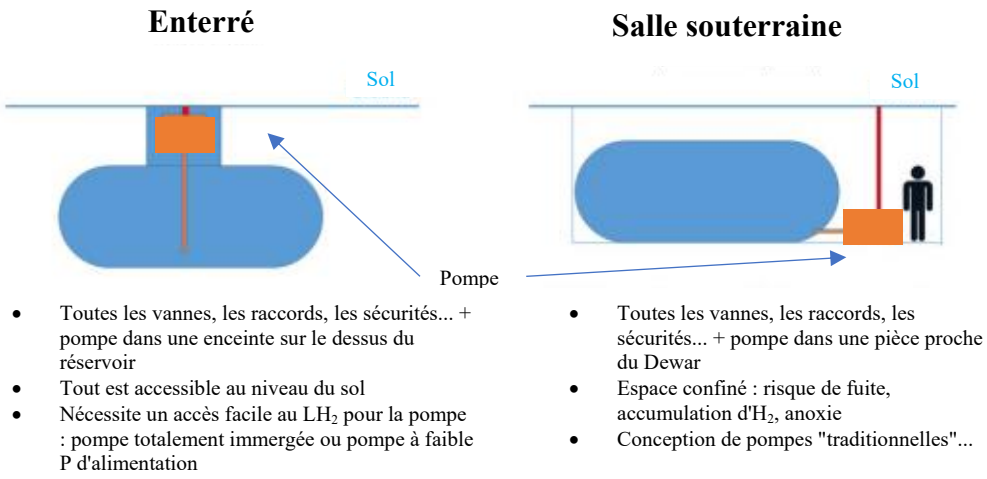


Figure 4 Les deux principales conceptions possibles pour les stockages souterrains de LH_2.

5.2.2 Cryostat pour applications stationnaires

Les réservoirs cryogéniques sont couramment utilisés depuis plus de 70 ans pour le stockage et le transport de l'hydrogène liquide.

5.3 Station de ravitaillement en hydrogène liquide

Fondamentalement, comme le montre la Figure 5, une station de ravitaillement basée sur le LH_2 comprend les éléments suivants :

- Un réservoir LH_2 (environ 20 m^3 – 1000 kg-H_2) avec une pression de service maximale de 10,3 bars,
- Une ligne de traitement isolée allant du fond du réservoir de stockage à la pompe LH_2, conduisant LH_2 du réservoir de stockage à un vaporisateur ; ce dispositif permet de pomper LH_2 jusqu'à 1000 bars,
- Un réchauffeur atmosphérique (nommé VAP : huile chaude, électrique afin de chauffer l'hydrogène à 1000 bar),
- Tampons gazeux de 1000 bars (quelques m^3) ; ces réservoirs tampons sont généralement de type I ou II (c'est-à-dire des cylindres métalliques ou un long tube métallique).

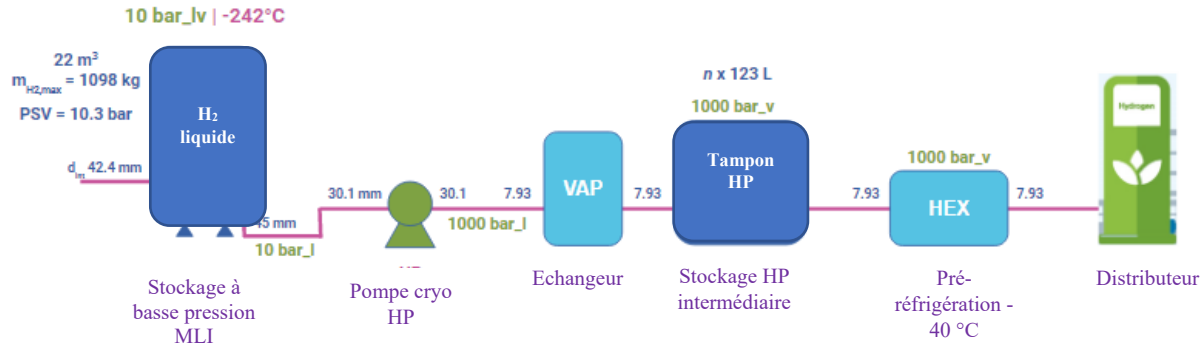


Figure 5 Croquis simplifié d'une station de ravitaillement en hydrogène liquide.

Toutes les autres parties (par exemple, le distributeur, le tuyau de remplissage, etc.) de la station de ravitaillement sont similaires à celles d'une station de ravitaillement en gaz classique (voir la comparaison à la figure 6).

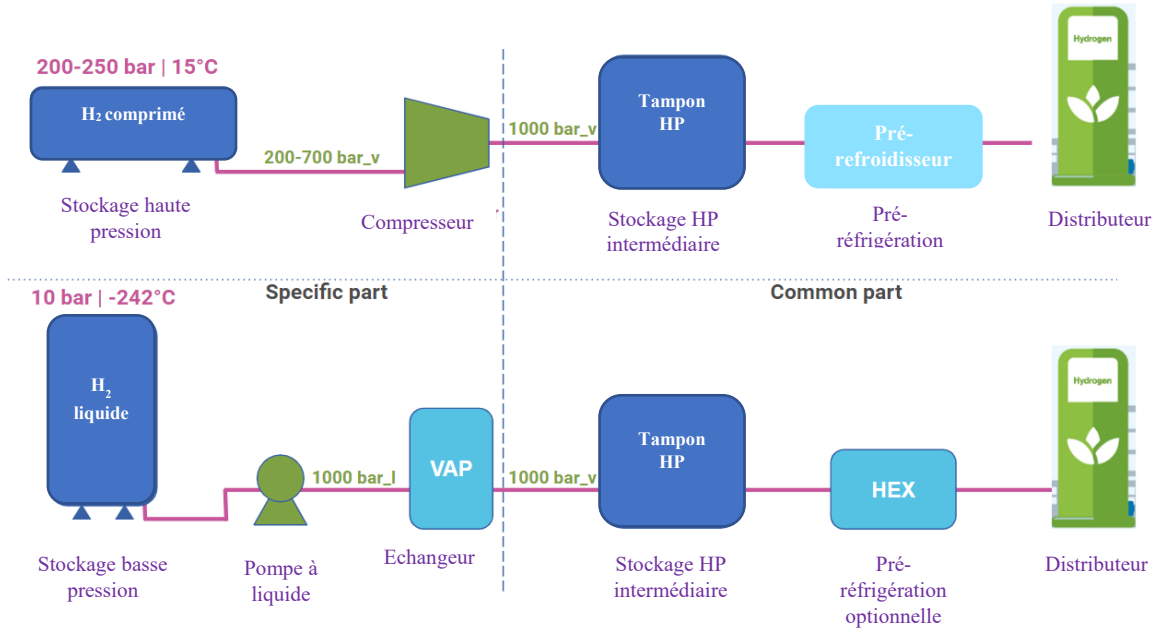


Figure 6 Comparaison simplifiée entre les stations de ravitaillement en hydrogène gazeux et en hydrogène liquide. En haut : station gaz, en bas station liquide.

Le réservoir LH_2 est livré par un camion LH_2. Ce camion LH_2 est composé d'un réservoir horizontal de 40 m^3 fonctionnant entre 1 et 12 bars (inventaire : 4 t - H_2). La liaison entre le stockage et le camion se fait via un flexible cryogénique. Le transfert s'effectue sans pompe. Un petit vaporisateur est présent sur la remorque pour produire une montée en pression de la phase gaz dans le réservoir du camion et ainsi permettre le transfert d'hydrogène liquide dans le stockage vertical stationnaire.

Plus concrètement, en Figure 7 est présentée la station de ravitaillement en hydrogène liquide (SRHL) Linde installée à Oakland (États-Unis).

Figure 7 La SRHL Linde et sa disposition à Oakland. (Sources : Linde)

En France, une distance de sécurité de 20 m entre le domaine public et la source d'hydrogène liquide est requise. Les caractéristiques de sécurité des stations de ravitaillement en hydrogène liquide sont presque les mêmes que celles des stations de ravitaillement en hydrogène gazeux (voir Tableau 3).

Tableau 3 Caractéristiques de sécurité pour la Station de Ravitaillement d'Hydrogène (SRH) gazeux/liquéfié.

Quoi	Où	Pour quoi
Flexible de remplissage et raccords qualifiés et validés	Procédé et distributeur	Éviter les fuites accidentelles

Quoi	Où	Pour quoi
Remplacement périodique du flexible de remplissage	Distributeur	Éviter les fuites accidentelles
H_2 détection	À l'intérieur du conteneur de processus A l'intérieur du distributeur	Activer les alarmes et fermer les vannes de coupure si nécessaire en cas de fuite accidentelle.
Détecteur de flamme (UV/IR)	Dans le conteneur de processus A l'extérieur, près du distributeur	Activer les alarmes et fermer les vannes de coupure si nécessaire en cas de rejet accidentel enflammé.
Vanne d'arrêt automatique	Plusieurs entre H_2 stockage et distributeur	Limite H_2 inventaire en cas de rejet accidentel
Surveillance de la pression du processus	Général	Détecter une chute de pression anormale due à une fuite ou à une rupture de tuyauterie.
Espaces confinés à ventilation naturelle	Conteneur processus Distributeur	Éviter d'atteindre la limite d'inflammabilité du mélange H_2-air en cas de rejet accidentel.
Ventilation forcée	Conteneur de processus pour certains modèles	Éviter d'atteindre la limite d'inflammabilité du mélange H_2-air en cas de rejet accidentel si la ventilation naturelle n'est pas possible ou pas assez efficace.
Équipement certifié ATEX	Dans les espaces confinés où des fuites peuvent se produire (c'est-à-dire les patins et le distributeur).	Éviter les sources d'inflammation
Flexible mis à la terre	Distributeur	Prévenir les étincelles causées par l'électricité statique pendant le ravitaillement en carburant.
Test d'étanchéité automatique avant le remplissage	Général	Éviter les fuites accidentelles
Limiteurs de débit	Général	Limiter le débit en cas de rejet ou de rupture de la tuyauterie
Temps de fermeture automatique	Général	Fermer les vannes d'alimentation H_2 en cas de rupture ou de fuite sur le flexible

Quoi	Où	Pour quoi
Dispositif anti-arrachement (break-away device)	Distributeur	Éviter les fuites importantes en cas d'arrachement du flexible par oubli de déconnexion du véhicule au démarrage
Protection contre les agressions mécanqiques (borne)	Distributeur	Protéger le distributeur des agressions mécaniques majeures par emboutissage accidentel d'un véhicule et éviter les fuites catastrophiques.
Bouton d'arrêt d'urgence, dispositif coup de poing	Quelques mètres du distributeur	Fermer les vannes d'alimentation H_2 en cas d'urgence
Dalle de béton conductrice (mise à la terre)	Distributeur	Prévenir les étincelles causées par l'électricité statique pendant l'opération de remplissage

5.3.1 Autobus

La plupart des bus transportent l'hydrogène sous forme de gaz comprimé. Il existe cependant quelques exemples où l'hydrogène a été stocké sous forme liquide.

6. Dangers de l'hydrogène liquide et risques associés pour les intervenants

Les dangers pour la santé, associés au rejet d'hydrogène liquide sont décrits ci-dessous.

- Le contact avec l'hydrogène liquide ou ses éclaboussures sur la peau ou dans les yeux peut provoquer de graves brûlures par le froid, des *gelures ou une hypothermie.*
- Les *brûlures cryogéniques* peuvent également résulter du contact de parties non protégées du corps humain avec des fluides ou des surfaces froides.
- L'inhalation de vapeurs d'hydrogène froides peut provoquer une *gêne respiratoire* et peut entraîner l'*asphyxie*.
- Le contact physique direct avec du LH_2, des vapeurs froides ou un équipement froid peut provoquer des *lésions tissulaires* graves. *Un* contact momentané avec une petite quantité de liquide peut ne pas présenter un aussi grand danger de brûlure car un film protecteur d'hydrogène gazeux s'évaporant peut se former (ébullition de film). Le danger de

congélation survient lorsque de grandes quantités sont déversées et que l'exposition est prolongée[2] .

- Le personnel ne doit pas toucher les parties métalliques froides et doit porter des *vêtements de protection*. Ils doivent également protéger la zone touchée avec une couverture souple.
- *Des dysfonctionnements cardiaques* sont probables lorsque la température interne du corps descend à 27°C ou moins, et la mort peut survenir lorsque la température interne du corps descend à moins de 15°C.
- *L'asphyxie* est également possible si de l'hydrogène liquéfié est libéré et vaporisé à l'intérieur.

Références

[1] Rossini FD. A report on the international practical temperature scale of 1968. Commission I.2: Thermodynamics and thermochemistry. International union of pure and applied chemistry. P.557-P.570.

[2] Cengel, Yunus A. and Turner, Robert H. (2004). Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill, p.78.

[3] Klier J., et al, A new cryogenic high-pressure H_2 test area: First results. Proc 12th IIR Int Conf, Dresden (2012).

[4] Edeskuty F.J., Stewart W.F., Safety in the handling of cryogenic fluids. The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, New York (1996).

[5] Bonhoeffer, K.F., Harteck, P. Experimente über Para- und Orthowasserstoff. Naturwissenschaften 17, 182 (1929).

[6] Proust C., INERIS research performed within PRESLHY. Presentation at the 13th Int Symp Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig (2020).

[7] NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident (1986). (1997). Available at http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-contents.html [access 04.04.2021]

[8] GTR, Proposal for a Global Technical Regulation (GTR) on hydrogen fuelled vehicles, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. United Nations. Economic Commission for

[2] Effet de l'azote liquide : https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291

Europe. Inland Transport Committee. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, 160th Session, Geneva, 25-28 June 2013.