



SECURITE : TRANSPORT, STOCKAGE ET UTILISATION

Sommaire

1. Contexte Général
2. Spécificités de l'hydrogène du point de vue des risques
3. Principales caractéristiques des scénarios accidentels dans le stockage et le transport d'hydrogène
4. Moyens généraux de prévention du risque hydrogène
5. Conclusion

1. Contexte général

Depuis plus d'un siècle, l'hydrogène est utilisé dans l'industrie chimique. Dans ce contexte, les problèmes de sécurité sont bien connus et maîtrisés. En revanche, son usage à des fins énergétiques, tel qu'il se développe aujourd'hui, pose de nouveaux problèmes de sécurité que ce soit au niveau de sa production, de sa distribution pour une utilisation dans les transports ou encore de ses applications stationnaires (cogénération, alimentations de secours, groupes électrogènes). Des mesures de sécurité qui s'imposent d'autant plus qu'actuellement son déploiement est mis en œuvre dans le cadre du « Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique », décidé par le gouvernement en 2018¹.

2. Spécificités de l'hydrogène du point de vue des risques

L'hydrogène, gaz incolore et inodore, n'est pas spontanément détectable par nos sens. Ni toxique ni explosif lorsqu'il est dilué dans l'air, il devient inflammable et potentiellement explosif dans certaines conditions détaillées dans la Fiche 7.1 qui précède. Il faut donc prendre toutes les mesures nécessaires pour éviter qu'il ne se répande hors des enceintes où il est stocké ou des canalisations dans lesquelles il circule.

Plusieurs caractéristiques spécifiques à l'hydrogène sont de nature à augmenter le risque :

- **Sa facilité à fuir.** La taille de sa molécule, la plus petite de toutes, et sa faible viscosité lui permettent de traverser des ouvertures du plus petit diamètre. Le risque de fuite se trouve ainsi plus élevé avec l'hydrogène qu'avec les autres gaz. Seul l'hélium dont l'atome a un diamètre du même ordre² lui est comparable au niveau de la potentialité de fuite. De ce fait, étant un gaz neutre, non inflammable, l'hélium est utilisé pour tester sans risque l'étanchéité des installations destinées à contenir de l'hydrogène.

¹ https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf

² Respectivement 1,06 et 2,6 Å pour le diamètre de la molécule d'hydrogène et celui de l'atome d'hélium.

- Sa perméation à travers les matériaux. Une propriété particulière de l'hydrogène lui permet également de traverser certains matériaux par perméation. À la différence d'un écoulement, la perméation est un phénomène de diffusion chimique à travers un matériau des atomes d'hydrogène provenant de la dissociation des molécules à la surface de ce matériau. Le moteur de cette diffusion est la différence de concentration ou de pression partielle de l'hydrogène entre les parois du matériau. C'est le cas en particulier d'un certain nombre de matériaux polymères.
- La fragilisation de certains matériaux métalliques par corrosion fissurante. Il s'agit de la propension des atomes d'hydrogène à pénétrer dans certains alliages métalliques, endommageant la structure cristalline, rendant le matériau fragile et accélérant la propagation des micro-fissures notamment lorsqu'il y a des contraintes. Ce phénomène de corrosion fissurante peut aller jusqu'à provoquer des ruptures brutales du matériau bien en dessous de sa limite de rupture en l'absence d'hydrogène. Les aciers ferritiques sont souvent sensibles à cette fragilisation. En revanche, les alliages à base d'aluminium sont en général assez peu sensibles à cette fragilisation tout comme le sont les aciers inoxydables du type 316L.
- Sa très faible énergie d'inflammation. L'énergie minimale d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est de 17 $\mu\text{J}/\text{mole}$ (dans les proportions stœchiométriques), soit plus de 15 fois inférieure à celle du Propane (260 $\mu\text{J}/\text{mole}$) ou du gaz naturel (290 $\mu\text{J}/\text{mole}$), et son domaine inflammable à pression et température ambiantes est très étendu, de 4% à 75% en volume. La probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est donc très grande même si des précautions sont prises pour éviter toute flamme ou étincelle à proximité de la zone à risque. Selon des sources portant sur l'analyse de 409 incidents ou accidents, seules 10% des fuites n'ont pas donné lieu à une inflammation³.
- Les caractéristiques spécifiques de sa flamme. Celle-ci est très peu éclairante car le rayonnement de l'hydrogène chauffé se situe essentiellement dans le domaine ultra-violet. Le rayonnement le plus visible (de couleur orangée) se situe généralement au niveau de la vapeur d'eau résultant de la combustion, tandis que le cœur de la flamme très chaud (supérieur à 2 000°C) est pratiquement invisible dans le jour. Cette particularité de quasi invisibilité des flammes constitue un danger supplémentaire pour les équipes d'intervention lors d'incendies.
- Le risque de détonation. Sous certaines conditions (énergie d'inflammation élevée, obstacles accélérant la flamme, niveau de turbulence important) et lorsque la concentration en hydrogène dans l'air est comprise entre 11% et 59%, il peut y avoir détonation. Celle-ci (cf. Fiche 7.1) se caractérise par un front de flamme se déplaçant à vitesse supersonique accompagné d'ondes de choc. Elle conduit à un danger supplémentaire par rapport à la déflagration dû à de fortes surpressions capables de se propager à grandes distances et pouvant provoquer de graves dégâts sur les bâtiments et des risques très accrus pour les personnes.

Ces caractéristiques induisent des précautions particulières pour toutes les installations utilisant l'hydrogène, elles sont précisées ci-dessous.

3. Principales caractéristiques des scénarios accidentels dans le stockage et le transport d'hydrogène

1 - Scénarios concernant l'hydrogène gazeux.

Un accident est toujours initié par une fuite d'hydrogène hors de son contenant (réservoir, canalisation, compresseur, pile à combustible ...) qui conduit à la présence de cet hydrogène dilué dans l'air ambiant. Le

³ Zalosh R.G., T.P. Short, Comparative analysis of hydrogen fires and explosions incidents – Factory Mutual Research Corp., Norwood, MA (1978).

scénario accidentel qui peut alors survenir dépend essentiellement des facteurs clés suivants :

- **Le débit de la fuite.** On peut envisager, pour schématiser, deux cas extrêmes : la fuite à très faible débit et la fuite à très fort débit.
Le cas de la fuite à faible débit résulte en général du défaut d'étanchéité d'un circuit ou de la perméation excessive d'un matériau utilisé. Le risque principal est ici l'accumulation progressive de l'hydrogène si le milieu est confiné ou mal ventilé. Il y a alors une inflammation tardive du pré-mélange constitué. Ce scénario conduit à une déflagration voir dans certains cas à une détonation (par exemple s'il y a des obstacles conduisant à une forte accélération de la flamme ainsi que l'énergie nécessaire pour enflammer le mélange). A l'air libre, à l'extérieur sans obstacle proche, ce type de fuite est en général sans conséquences. L'hydrogène se dilue rapidement dans l'air ambiant par diffusion verticale à grande vitesse et la zone de concentration supérieure à la limite d'inflammabilité demeure d'étendue négligeable.
Le cas de la fuite à fort débit, certainement beaucoup plus rare, résulte de la rupture brutale d'un élément contenant l'hydrogène (suite à une agression extérieure ou à un défaut de tenue mécanique du contenant). Si le contenant est sous pression comme c'est souvent le cas, il apparaît un jet d'hydrogène dans la partie proche de la brèche. La vitesse de ce jet atteint ou dépasse la vitesse sonique dès que la pression dans le contenant dépasse 1,9 bar. L'inflammation, qui peut alors survenir spontanément, conduit à un jet enflammé avec ou sans déflagration selon que cette inflammation a lieu précocement ou tardivement après le début de la fuite brutale d'hydrogène.
- **Le confinement.** En milieu libre, répétons-le, la légèreté de l'hydrogène et son fort coefficient de diffusion conduisent à une dispersion verticale très rapide qui font que la zone inflammable (concentration volumique en hydrogène comprise entre 4 et 75% à pression et température normales) est de faible étendue sauf en cas de débit très fort. En milieu confiné au contraire, l'accumulation possible de l'hydrogène peut conduire à l'inflammation d'un important volume pré-mélangé avec l'air donnant lieu à une déflagration qui peut même transiter vers la détonation sous l'effet des obstacles et de la turbulence si les proportions du mélange sont suffisamment proches de la stœchiométrie (29,5% en volume).
- **Le type et l'instant de l'inflammation.** L'instant de l'inflammation peut influencer grandement sur la gravité de l'accident. Une inflammation précoce conduira à une déflagration faible ou inexistante, réduisant le risque à l'exposition thermique au voisinage de la flamme. Au contraire une inflammation retardée pourra conduire à la déflagration d'une grande quantité d'hydrogène accumulé.
Enfin, un autre cas est celui de la déflagration de l'hydrogène pré-mélangé à l'air dans une petite enceinte au sein d'un plus vaste nuage extérieur engendré par une fuite préalable⁴. Il peut alors y avoir une détonation qui induit des effets mécaniques étendus et catastrophiques en raison des surpressions très élevées et extrêmement rapides qui en résultent.

Un aperçu synthétique de ces scénarios accidentels en fonction des facteurs décrits ci-dessus est donné par le diagramme présenté sur la figure 1 qui suit.

⁴ Par exemple une déflagration dans une pile à combustible située dans un local où au préalable de l'hydrogène s'est largement répandu à la suite d'une fuite.



Figure 1 : Diagramme des scénarios accidentels

2. Hydrogène liquide

Le liquide est l'état le plus approprié au stockage et au transport des grandes quantités d'hydrogène, de l'ordre d'une ou de plusieurs tonnes (cf. Fiche 4.3). Il est dans ce cas contenu dans des réservoirs cryogéniques dont l'isolation thermique, aussi bonne soit-elle, n'est pas totale⁵ avec pour conséquence une

⁵ En d'autres termes, des conditions parfaitement adiabatiques sont matériellement irréalisables.

légère ébullition de l'hydrogène due aux faibles apports de chaleur correspondants à cette imperfection d'isolation. Ces réservoirs ne doivent donc pas être étanches afin de permettre un dégagement permanent d'hydrogène gazeux (très précisément de la vapeur d'hydrogène) afin d'éviter un accroissement excessif de la pression. Cet apport de gaz entraîne les exigences de sécurité exposées ci-dessus, exigences qui s'ajoutent à celles liées aux risques que présentent la manipulation habituelle des liquides cryogéniques⁶.

3. Hydrogène mélangé au gaz naturel

L'adjonction d'une certaine proportion d'hydrogène dans le gaz naturel a pour but d'en améliorer le pouvoir énergétique et de diminuer son rejet de dioxyde de carbone. Il est prévu que ce processus, actuellement expérimenté (cf. Fiche 9.5) soit peu à peu déployé dans le réseau de distribution. Dans cette perspective l'INERIS⁷ a récemment publié un rapport d'étude précisant les conditions de sécurité qu'exige de mise en œuvre de cette adjonction d'hydrogène au gaz naturel : « Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel : état des lieux et perspectives »⁸.

4. Secours liés aux accidents hydrogène

Face au développement de l'hydrogène comme vecteur énergétique, dans la mobilité, le stationnaire et comme moyen de stocker l'électricité, une formation spécialement dédiée à ce gaz a été mise en place à l'École nationale supérieure des officiers de sapeurs-pompiers (Ensosp), à Aix-en-Provence dans les Bouches-du-Rhône⁹. La création de cette formation a été rendue possible par le projet européen HyResponse, lancé en 2013. Durant cinq jours se succèdent des cours théoriques, des essais en plate-forme opérationnelle et des exercices utilisant la réalité virtuelle. Cette formation innovante est destinée aux sapeurs-pompiers et aux industriels produisant ou utilisant de l'hydrogène.

Pour l'information du grand public, en 2016, les pompiers du département de La Manche ont filmé une démonstration d'intervention sur l'incendie d'un véhicule hydrogène qui montre que ce type d'accident est entièrement maîtrisable¹⁰.

4. Moyens généraux de prévention du risque hydrogène

L'examen des causes d'accidents hydrogène, la spécificité des risques correspondants et l'analyse de la gravité potentielle des accidents conduisent à fixer en matière de sécurité les conditions suivantes :

1. Prendre toute mesure nécessaire pour éviter une quelconque fuite accidentelle d'hydrogène et pour limiter absolument la quantité relâchée si un tel incident venait à se produire ;
2. Prévoir le système de telle manière que, dans toute la mesure du possible, les fuites potentielles ne puissent intervenir qu'en milieu non confiné ;
3. 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.

Ces principes généraux induisent un certain nombre de recommandations pratiques (liste non exhaustive) :

1. Limiter les raccords vissés et leur préférer dans la mesure du possible les raccords soudés. Éviter les montages et démontages fréquents. Avant la mise en service et après chaque intervention s'assurer de l'étanchéité du circuit (par exemple à l'aide d'un détecteur à hélium) ;
2. Purger les canalisations à l'aide d'un gaz neutre (azote par exemple) après toute mise à l'arrêt de l'installation et avant toute remise sous hydrogène ;
3. Placer dans la mesure du possible les systèmes hydrogène à l'extérieur des locaux (notamment pour les stockages). Pour les véhicules, lorsque cela est possible, placer le stockage en toiture (en particulier dans le cas des véhicules de transport en commun) ;

⁶ <https://www.cchst.ca/oshanswers/prevention/cryogens.html>

⁷ Institut National de l'Environnement industriel et des RISques.

⁸ https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRA-19-178263-01884B_VF_19092019.pdf

⁹ <http://www.travail-et-securite.fr/ts/dossier/776/Vehicules-electriques/Des-formations-au-secours-des-pompiers.html>

¹⁰ <https://sylfen.com/fr/2016/11/08/la-securite-hydrogene-cest-encore-les-pompiers-qui-en-parlent-le-mieux/>

4. Prévoir des détecteurs d'hydrogène judicieusement placés : près des points de fuite potentiels et partout où il y a risque d'accumulation d'hydrogène. Prévoir une certaine redondance des détecteurs pour conserver un niveau de sécurité suffisant en cas de panne de l'un d'entre eux ;
5. Prévoir un dispositif de coupure automatique de l'alimentation en hydrogène en cas de détection de fuite (en général on fixe un seuil d'alarme à 25% de la LIE soit 1% en volume et un seuil de coupure à 50% de la LIE soit 2% en volume) ;
6. Doubler les vannes de coupure automatiques par des vannes manuelles situées dans des zones non exposées ;
7. En milieu confiné, prévoir une circulation d'air permanente étudiée de manière à éviter toute accumulation d'hydrogène dans des « zones mortes ». Préférer une ventilation par convection naturelle à condition de s'assurer qu'elle est suffisante et opérationnelle quelles que soient les conditions extérieures (vent et température notamment). Si l'on a recours à une ventilation forcée, prévoir la coupure automatique de l'arrivée d'hydrogène en cas d'arrêt de la ventilation ;
8. Une analyse de risque est nécessaire pour déterminer le type de fuite prévisible et déterminer le débit de ventilation à appliquer. Ce type de fuite prévisible dépend des éléments susceptibles d'être présents dans l'espace confiné : véhicules, PAC, électrolyseur, station de distribution éventuelle...
9. Appliquer la norme NF M58-003 « Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène ».

Ces recommandations spécifiques à l'hydrogène s'ajoutent aux principes généraux de sécurité qui s'appliquent à tous les systèmes présentant des risques d'incendie et d'explosion. Pour le cas particulier de la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène l'ADEME a publié un guide d'information :

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-securite-h2-vehicules-station-service-8506.pdf>

5. Conclusion

La manipulation de l'hydrogène comme celle de tout gaz combustible présente un certain nombre de dangers. Néanmoins, une bonne connaissance de ceux-ci et des moyens d'y parer doit permettre de mettre en œuvre tous les systèmes utilisant l'hydrogène dans de bonnes conditions de sécurité. C'est ainsi que pourra se développer le recours à ce vecteur énergétique avec un niveau de risque suffisamment faible pour être socialement acceptable. C'est d'ailleurs à ce titre qu'existent de nombreuses initiatives et travaux liés à la sécurité hydrogène. En 2014 le «First HyResponse Workshop on H2 safety training»¹¹ s'est tenu à l'Académie Française du Feu à Aix en Provence en coopération avec l'EHA (European Hydrogen Association). Un second workshop s'est tenu en 2016. Quant à l'International Energy Agency Hydrogen Implementig Agreement, elle poursuit depuis 1977 les échanges concernant les recherches et développements sur l'hydrogène énergie et en particulier a consacré les tâches 19 et 31 à la sécurité hydrogène¹². Le récent document « Accidentologie de l'hydrogène » du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire¹³ établit une synthèse de données sur la génération et sur les principales causes des accidents dus à l'hydrogène.

¹¹ www.h2euro.org/first-hyresponse-workshop-on-h2

¹² www.ieahydrogensafety.com/ et www.ieahia.org/pdfs/canada/pres_task31_toronto_june2012.pdf

¹³ https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wpcontent/files_mf/1373986645SYHydrogene2008.pdf