



## 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

L'hydrogène est utilisé depuis de nombreuses années dans l'industrie chimique. Les problèmes de sécurité hydrogène dans ce contexte industriel sont donc bien connus et maîtrisés. Cependant l'usage de l'hydrogène à des fins énergétiques, tel qu'il se profile aujourd'hui à travers la production et la distribution que ce soit pour les transports ou pour les applications stationnaires (cogénération, alimentations de secours, groupes électrogènes) pose de nouveaux problèmes de sécurité qu'il convient de prendre en compte. Le but de cette fiche est de donner quelques éléments sur ce sujet.

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

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore, il n'est donc pas spontanément détectable par nos sens. Ni toxique ni explosif, dilué dans l'air, il devient inflammable et potentiellement explosif dans certaines conditions. 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 de l'hydrogène sont de nature à augmenter le risque :

- La facilité à fuir. La petite taille de sa molécule et sa faible viscosité permettent à l'hydrogène de traverser des ouvertures de taille extrêmement faible. Le risque de fuite lorsqu'un circuit n'est pas parfaitement étanche est donc plus élevé avec l'hydrogène qu'avec la plupart des autres gaz. De ce point de vue l'hydrogène n'est comparable qu'à l'Hélium, gaz non inflammable, qui est d'ailleurs souvent utilisé pour tester sans risque l'étanchéité des installations destinées à contenir de l'hydrogène.
- La perméation à travers les matériaux. Les propriétés particulières de l'hydrogène lui permettent également de traverser certains matériaux par perméation. C'est le cas en particulier d'un certain nombre de matériaux polymères. 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.
- La fragilisation de certains matériaux métalliques. 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 sous contrainte. 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 alliages d'aluminium sont en général assez peu sensibles à la fragilisation de même que les aciers inoxydables du type 316L. Au contraire, les aciers ferritiques sont souvent sensibles à cette fragilisation.
- La très faible énergie d'inflammation. L'énergie minimale d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est de 20  $\mu\text{J}$  (dans les proportions stœchiométriques), soit plus de 10 fois inférieure à celle

du Propane (260 µJ) ou du gaz naturel (290 µJ), 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 accidents ou incidents, seules 10% des fuites n'ont pas donné lieu à une inflammation<sup>1</sup>.

- **Les caractéristiques spécifiques de la flamme d'hydrogène.** La flamme d'hydrogène 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 caractéristique constitue un danger supplémentaire en particulier pour les équipes d'intervention en cas d'incendie.
- **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. La détonation 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 des dégâts graves sur les bâtiments et des risques très accrus pour les personnes.

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

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

Nous examinerons d'abord les scénarios concernant l'hydrogène gazeux.

Un accident est toujours initié par une fuite d'hydrogène hors de son conteneur (réservoir, canalisation) qui conduit à la présence d'hydrogène dilué dans l'air ambiant. Le scénario accidentel qui peut alors survenir dépend essentiellement des quelques 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 et mal ventilé avec une inflammation tardive du prémélange ainsi 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). En milieu libre (à l'extérieur sans obstacle proche) ce type de fuite est en général sans conséquences, l'hydrogène se diluant rapidement dans l'air ambiant et la zone de concentration supérieure à la limite d'inflammabilité demeurant 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 conteneur). Si le conteneur est sous pression comme c'est souvent le cas, il apparaît un jet d'hydrogène dans la partie proche de la brèche et dont la vitesse atteint ou dépasse la vitesse sonique dès que la pression dans le conteneur dépasse 1,9 bar. L'inflammation, qui peut survenir spontanément, conduit à un jet enflammé avec ou sans déflagration selon que cette inflammation a lieu précocement ou tardivement après le début du rejet d'hydrogène.
- **Le confinement.** En milieu libre, 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 prémélangé 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).

---

<sup>1</sup> Zalosh R.G., T.P. Short, Comparative analysis of hydrogen fires and explosions incidents – Factory Mutual Research Corp., Norwood, MA (1978)

- **Le type et l'instant d'inflammation.** L'instant d'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, une énergie d'inflammation forte (par exemple la déflagration de l'hydrogène prémélangé à l'air dans une petite enceinte au sein du nuage plus vaste à l'extérieur<sup>2</sup>) peut conduire à 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.

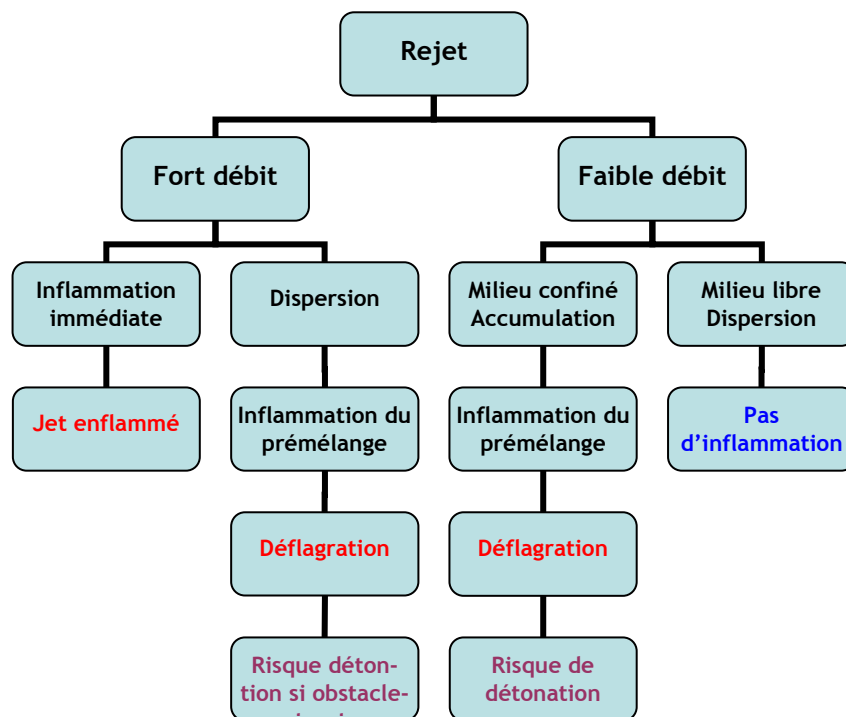


Figure 1 : Diagramme des scénarios accidentels

#### **4. Moyens généraux de prévention du risque hydrogène**

L'examen des causes d'accidents hydrogène, la spécificité du risque hydrogène et l'analyse de la gravité potentielle des accidents que nous avons présentés dans les paragraphes précédents 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 certains nombre de recommandations pratiques. Nous donnons ci-dessous, à titre d'exemple, une 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 (à l'aide d'hélium par exemple)
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

<sup>2</sup> Par exemple dans une pile à combustible contenant de l'hydrogène résultant d'une fuite et qui s'est déjà largement propagée dans le local ou elle se trouve

3. Placer dans la mesure du possible les systèmes hydrogène à l'extérieur des locaux (notamment les stockages). Pour les véhicules, lorsque cela est possible placer le stockage en toiture (cas des véhicules de transport en commun par exemple)
4. Prévoir des détecteurs d'hydrogène judicieusement placés : près des points de fuite potentiels et partout où il ya 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 vol. et un seuil de coupure à 50% de la LIE soit 2% en vol.)
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 bien 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 ».

Bien entendu, 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.

## **5. Conclusion**

La manipulation de l'hydrogène présente un certain nombre de dangers sérieux. Néanmoins, une bonne connaissance de ces dangers et de leur parade doit permettre de mettre en œuvre une conception sûre des systèmes utilisant l'hydrogène. Il est alors possible d'envisager le développement de 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 »<sup>3</sup> s'est tenu à l'Académie Française du Feu à Aix en Provence en coopération avec l'EHA (European Hydrogen Association). Un second workshop est prévu en 2016. Quant à l'International Energy Agency Hydrogen Implementing 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 hydrogène<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> [www.h2euro.org/first-hyresponse-workshop-on-h2](http://www.h2euro.org/first-hyresponse-workshop-on-h2)

<sup>4</sup> [www.ieahydrogensafety.com/](http://www.ieahydrogensafety.com/) et [www.ieahia.org/pdfs/canada/pres\\_task31\\_toronto\\_june2012.pdf](http://www.ieahia.org/pdfs/canada/pres_task31_toronto_june2012.pdf)