

INFLAMMABILITE ET EXPLOSIVITE DE L'HYDROGENE

Sommaire

1. La combustion de l'hydrogène

- Conditions de combustion
- Cas de l'hydrogène
- Limites explosives –plage d'explosivité

2. Les explosions

- Régimes d'explosions
- Quel régime pour quelle explosion ?

1 – La combustion de l'hydrogène

Considérations générales sur les incendies/explosions

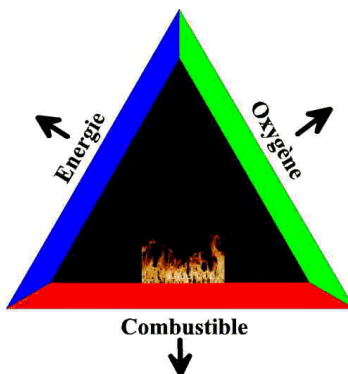


Figure 1 -Triangle du feu/explosion
(source : <http://www.firemanbiker.ch/triangle.htm>)

Pour qu'il y ait combustion, trois conditions doivent être respectées :

- La présence d'un carburant en concentration dans sa plage d'explosibilité (hydrogène, propane, méthane...)
- La présence d'un comburant (oxygène) en concentration supérieure à la concentration limite en oxygène
- Une énergie d'inflammation qui dépasse l'énergie minimale d'inflammation (étincelle, point chaud ...)

La concentration de carburant dans le comburant est également un facteur déterminant pour savoir si la combustion peut avoir lieu. La concentration minimale autorisant la combustion est appelée " Limite Inférieure d'Explosibilité " (LIE) et la concentration maximale est la " Limite Supérieure d'Explosibilité " (LSE). La zone délimitée par la LIE et la LSE est le « domaine » ou la « plage d'explosibilité ». La concentration limite en oxygène peut être définie comme la teneur la plus élevée en oxygène en dessous de laquelle l'explosion devient impossible.

Cas de l'hydrogène

L'hydrogène possède un domaine d'explosivité¹ large, 4%-75%, à pression et température ambiantes. Son énergie minimale d'inflammation varie en fonction de la concentration en hydrogène et en oxygène à la stœchiométrie (pour chaque molécule d'hydrogène il y a une demi-molécule d'oxygène) donc, pour 29.5% en volume d'hydrogène dans l'air, sa valeur est de 17µJ.

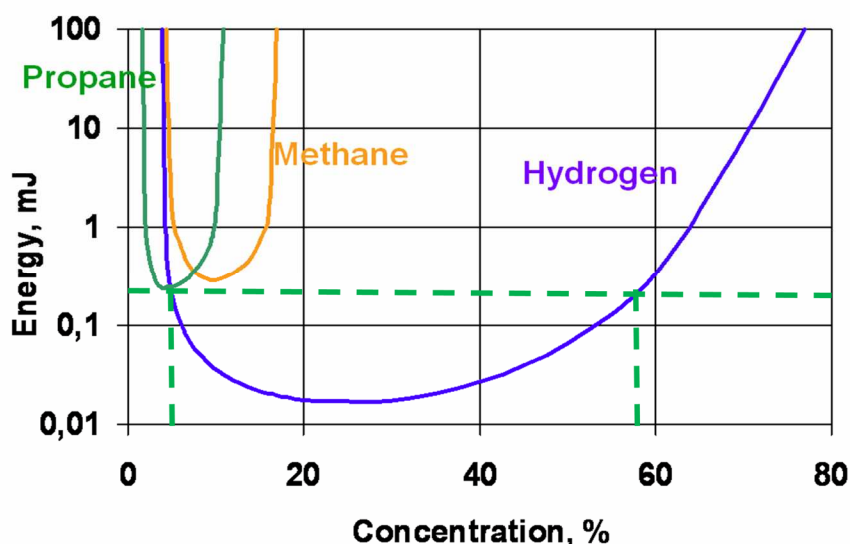


Figure 2 - Domaine d'explosivité du propane, du méthane et de l'hydrogène

Par contre, la température d'auto inflammation, la température à partir de laquelle l'hydrogène s'enflamme spontanément si il est dans la plage d'inflammabilité, est plus élevée que celles de la plupart des autres gaz inflammables (585°C/858°K). La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et est très chaude (2045°C/2318°K).

Propriétés	Unités	Hydrogène	Propane
Domaine d'explosivité	% vol	4 - 75	2,1 – 9,5
Energie minimale d'inflammation	µJ	20	260
Température d'auto-inflammation	°K	858	760
Vitesse de combustion	cm/s	265-325	30-40
Energie d'explosion	g TNT/g produit kg TNT/m ³ gaz (à PE)	24 2,02	10 20,3

Tableau 1 - Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène et du propane dans l'air à pression et température atmosphériques

Sources :

- Commission of the European Communities and the Gouvernement of Québec, novembre 1993
- ISO/PDTR 1 5916 Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à hydrogène

Ces propriétés font de l'hydrogène un gaz extrêmement inflammable. L'énergie d'inflammation de 20 µJ correspond à des valeurs obtenues par des décharges électrostatiques d'origine humaine. De nombreuses

¹ Terme réglementaire, néanmoins on trouve parfois celui de domaine d'inflammation. Il faut en effet noter qu'à la concentration minimale de 4%, il n'y a pas une explosion mais seulement une inflammation.

précautions doivent donc être prises lors de la mise en œuvre de cette substance. Dans l'oxygène pur, cette énergie minimale d'inflammation est seulement de 3 µJ, un point important pour la sécurité des électrolyseurs.

Limites explosives - plage d'explosivité

L'étendue de la plage d'explosivité dans l'air est fonction de la température et de la pression. A pression constante, elle croît avec la température. Sinon, elle suit les variations de la pression pour des mélanges H₂/O₂ (voir Figure 3)

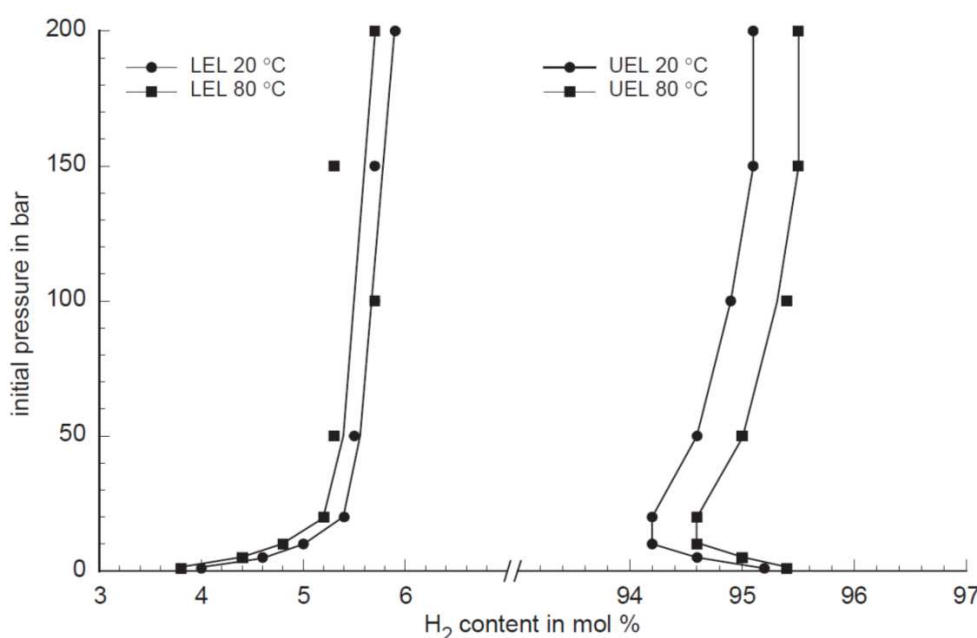


Figure 3 - LIE et LSE des mélanges H₂/O₂ en fonction de la pression et température²

2 - Les explosions

L'inflammation d'un nuage de gaz formé lors d'une fuite sur une canalisation ou sur un stockage peut, dans certaines configurations, donner lieu à une explosion. Cette explosion est une libération soudaine d'énergie entraînant la propagation d'un front de flamme et une onde de surpression. Cependant, dans la plage entre 4% à 8 % en volume d'hydrogène dans l'air, l'inflammation du mélange donne lieu à un « flash-fire », aussi appelé « feu de nuage ». De ce fait, le principal effet de ce phénomène dangereux est thermique en absence de surpression.

Régimes d'explosion

Deux régimes d'explosion différents sont possibles :

- **La déflagration** : dans ce cas, le front de flamme se déplace à vitesse subsonique. Les gaz frais sont comprimés par l'expansion du volume (effet piston). Il en résulte donc une augmentation continue de la surpression

² V. Schröder, B. Emonts, H. Janßen, H.-P. Schulze: Explosionsgrenzen von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen bei Drücken bis 200 bar, *Chemie Ingenieur Technik* (75), 7/2003, S. 914-918

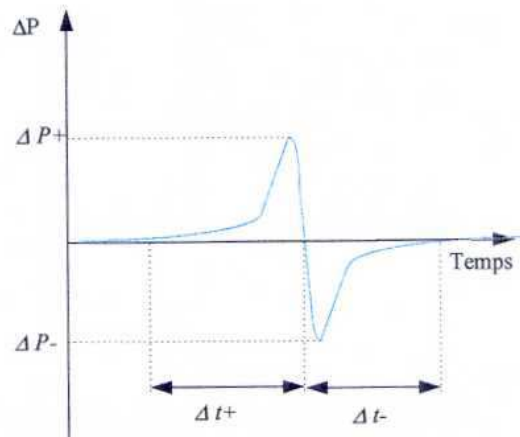


Figure 4 - Evolution de la surpression pour un régime de déflagration

(Source : Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – INERIS, juillet 1999)

Pour l'hydrogène dans l'air aux conditions stœchiométriques, la célérité de déflagration est de 2.6 ms^{-1} . En présence d'oxygène, la célérité peut augmenter jusqu'à $11\text{-}12 \text{ ms}^{-1}$, une valeur qui peut encore augmenter en fonction du confinement (exemple explosion dans une tube).

- **La détonation** : la vitesse du front de flamme est supersonique, le mélange hydrogène-comburant est comprimé dans des conditions quasi adiabatique avec pour résultat la formation d'une onde de choc.

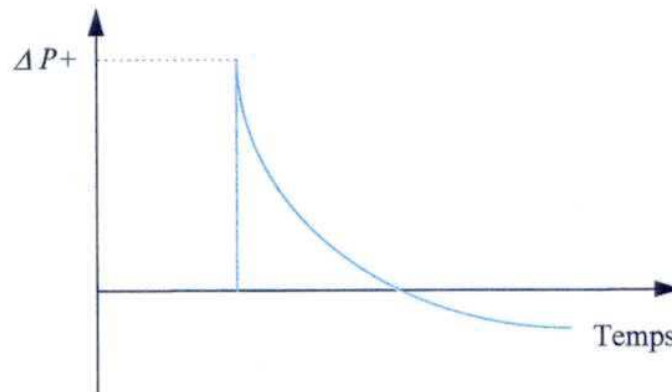


Figure 5 - Evolution de la surpression pour un régime de détonation

(Source : Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – INERIS, juillet 1999)

La plage de détonabilité de l'hydrogène varie en fonction de la géométrie du confinement, de l'énergie d'inflammation et du ratio du mélange. La littérature de combustion fournit des exemples de détonations se produisant avec des proportions de 11%, voire inférieures. Il n'y a aucune procédure de mesure normalisée pour cette propriété, contrairement aux limites d'explosivité.

Quel régime pour quelle explosion ?

Initialement le régime d'explosion dépendra essentiellement de la concentration de carburant dans le comburant. Dans le cas de l'hydrogène, le régime de « flash-fire » est obtenu pour des concentrations allant de 4 à 8% alors que la déflagration sera atteinte à partir de 8% et la détonation pourra, dans certaines configurations se produire à partir de 11% (la plage d'explosivité considérée est celle d'hydrogène dans l'air). Ces valeurs sont théoriques ; il est clair que de nombreux autres paramètres conditionnent le régime d'explosion.

Lorsque l'explosion est amorcée, son état peut transiter de la déflagration à la détonation (TDD). Les facteurs influents sur cette transition seront ceux agissant sur la vitesse du front de flamme, c'est à dire :

- la turbulence créée par la présence d'obstacles qui favorisent l'accélération du front de flamme ;
- divers mécanismes tels que les perturbations acoustiques, les forces d'Archimède et les gradients de pression.

La large plage de détonation de l'hydrogène ainsi que les nombreux phénomènes de turbulences intrinsèques au nuage laissent présager, dans le cas d'explosion de nuage d'hydrogène, un régime d'explosion rapide (déflagration rapide ou détonation).