

## INFLAMMABILITE ET EXPLOSIVITE DE L'HYDROGENE

### Sommaire

1. Introduction
2. Combustion
3. Inflammabilité
4. Explosivité
5. Conclusion

### 1. INTRODUCTION

Les remarquables propriétés de l'hydrogène en tant que combustible à la fois très énergétique et respectueux de l'environnement ne doivent en aucun cas minimiser la dangerosité qu'il présente comme cela est le cas pour tout combustible. Il est en effet dans certaines conditions inflammables voire explosif.

### 2. COMBUSTION

La combustion est une réaction exothermique d'oxydoréduction entre un combustible et un comburant qui le plus souvent est l'oxygène de l'air.

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

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

Ces trois conditions sont symbolisées par le triangle du feu<sup>1</sup>.

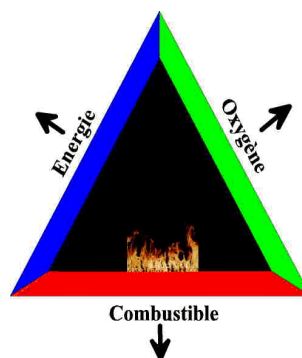


Figure 1 -Triangle du feu

<sup>1</sup> Source : <http://www.firemanbiker.ch/triangle.htm>. Longtemps le triangle du feu fut la base de la chimie du feu. Au début des années 1980, une quatrième partie fut identifiée et aujourd'hui, la chimie du feu est basée sur un tétraèdre comprenant l'oxygène, le carburant, la chaleur et les radicaux libres formés par oxydation du combustible sans lesquels aucune combustion avec flammes n'est possible, une situation qui n'est pas le cas avec le combustible hydrogène

La combustion de l'hydrogène dans l'air donne lieu à une flamme quasi-invisible et très chaude d'une température de 2045°C (2318°K).

La concentration de carburant dans le comburant est l'un des facteurs déterminants de la combustion, elle détermine les conditions d'inflammabilité.

### 3. INFLAMMABILITE

L'inflammabilité est la capacité d'un combustible à s'enflammer et à maintenir sa combustion.

#### Les limites d'inflammabilité

La plage de concentration gaz/air susceptible de produire un mélange combustible est limitée. Les concentrations au-dessous et au-dessus desquelles l'inflammation et la propagation de la flamme ne sont pas possibles sont appelées limites d'inflammabilité.

Lorsque le mélange est trop pauvre en combustible, l'inflammation ne se produit pas, le pourcentage de combustible est alors au-dessous de la Limite inférieure d'inflammabilité, LII. Au-dessus de ce seuil, le mélange combustible-comburant pourra brûler tant que l'on n'aura pas dépassé le taux maximum de combustible au-delà duquel le mélange devient trop pauvre en comburant. Ce deuxième seuil est la Limite supérieure d'inflammabilité, LSI. Ces deux limites sont généralement exprimées en pourcentage du volume de gaz inflammable dans le volume du mélange total. L'intervalle entre ces limites est le domaine d'inflammabilité au milieu duquel se situe la zone de la meilleure combustion lorsque les proportions du mélange correspondent exactement à la réaction chimique, sans excès de combustible ni de comburant. Cette condition correspond à la concentration stœchiométrique, qui assure, en théorie, la combustion complète, en flamme neutre, et donne la température la plus élevée.

La particularité de l'hydrogène est d'être un gaz hautement réactif et, de ce fait présente, une très large plage d'inflammation comme le montre le tableau 1 qui suit.

	<b>LII</b>	<b>LSI</b>
Hydrogène	4 %	75 %
Méthane	5 %	14 %
Propane	3 %	10 %
Butane	2 %	9 %

Tableau 1 – Limites d'inflammabilité de l'hydrogène et de combustibles courants

*En dessous de la limite inférieure d'inflammabilité, si l'inflammation ne peut se propager à l'ensemble de la masse gazeuse, le mélange gaz-air reste toutefois combustible et réagit au contact d'une flamme ou d'un filament métallique incandescent. Cette combustion trop pauvre en combustible, cesse immédiatement si on supprime la source d'énergie. Une propriété qui est mise en application dans certains explosimètres capables de mesurer des teneurs en gaz combustibles très au-dessous de la limite inférieure d'inflammabilité.*

#### Energie d'inflammation

L'énergie minimale d'inflammation varie en fonction de la concentration en hydrogène et en oxygène. A la concentration stœchiométrique (pour chaque molécule d'hydrogène il y a une demi-molécule d'oxygène), soit 29.5% en volume d'hydrogène dans l'air, sa valeur est de 17μJ/mole. Une énergie très faible comparée à celle des combustibles courants comme le montre le tableau 2 qui suit. Tableau qui montre également que l'hydrogène présente une valeur élevée de chaleur de combustion et une température de flamme voisine de celle des autres combustibles.

Gaz	Energie minimale d'inflammation mJ/mole	Chaleur de combustion kJ/g	Température de flamme °C	Température d'auto inflammation °C
H <sub>2</sub>	0,017	120	2 045	585-858
CH <sub>4</sub>	0,29	50	1 875	540
Propane	0,26	50	1 920	760
Essence	0,24	44,5	2 200	228-501

Tableau 2 - Inflammation de l'hydrogène et de combustibles courants

Ces propriétés font de l'hydrogène un gaz extrêmement inflammable. Sa très faible énergie d'inflammation correspond à des valeurs pouvant être obtenues par des décharges électrostatiques d'origine humaine. De nombreuses précautions doivent donc être prises lors de la mise en œuvre de ce gaz. Dans l'oxygène pur, cette énergie minimale d'inflammation est seulement de 3 µJ/mole, un point important pour la sécurité des électrolyseurs.

### L'auto-inflammation

En l'absence d'une source de flamme, le mélange hydrogène-air compris dans les limites d'inflammabilité, peut s'enflammer spontanément s'il est porté à une certaine température : la température d'auto-inflammation, appelée aussi température d'auto-ignition ou d'auto-combustion. Cette température est fonction de la pression, elle se situe dans la plage comprise entre 585 et 858°C<sup>2</sup>, au-dessus de celles de la plupart des autres gaz inflammables (tableau 2 précédent).

## 4. EXPLOSIVITE

Une explosion de gaz est une combustion instantanée qui se caractérise par une augmentation rapide de pression et de volume avec une importante libération d'énergie et généralement accompagnée d'une génération de hautes températures. Plus cette transformation s'effectue rapidement, plus il en résulte une surpression dont la détente jusqu'à la pression atmosphérique crée un souffle qui, selon sa vitesse, est déflagrant ou détonant avec une forte émission de bruit.

### Limites d'explosivité, plage d'explosivité

Ces limites déterminent la plage d'explosivité qui est incluse dans la plage d'inflammabilité. Dans le cas de l'hydrogène à pression et température ambiantes, ces limites sont confondues<sup>3</sup> et vont de 4 à 75%<sup>4</sup>. Plus généralement 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 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (cf. Figure 2)

<sup>2</sup> La température d'auto-inflammation peut également être influencée par la nature des parois ou la présence de substances pouvant avoir une action d'activation (action catalytique) ou au contraire d'inhibition.

<sup>3</sup> De ce fait, domaine d'explosivité est le terme réglementaire, néanmoins on trouve parfois celui de « domaine d'inflammation ».

<sup>4</sup> En fait, à la concentration minimale de 4%, il n'y a guère d'explosion mais seulement inflammation.

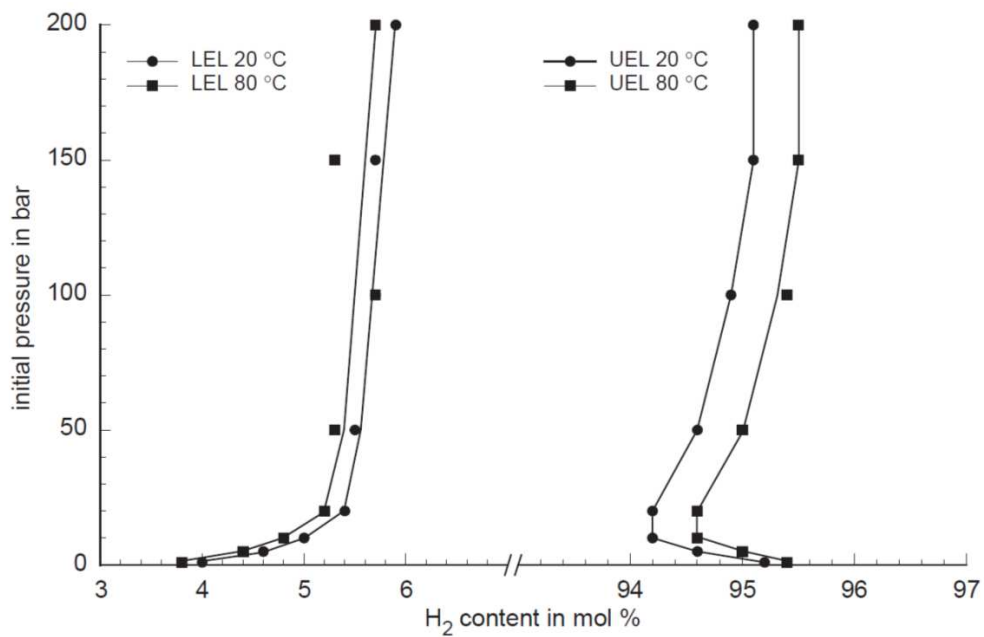


Figure 2 - LIE et

des mélanges H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> en fonction de la pression et température<sup>5</sup>

LSE

La figure 3 qui suit met en évidence la largeur du domaine d'explosivité de l'hydrogène devant celui de deux hydrocarbures combustibles courants le méthane et le propane.

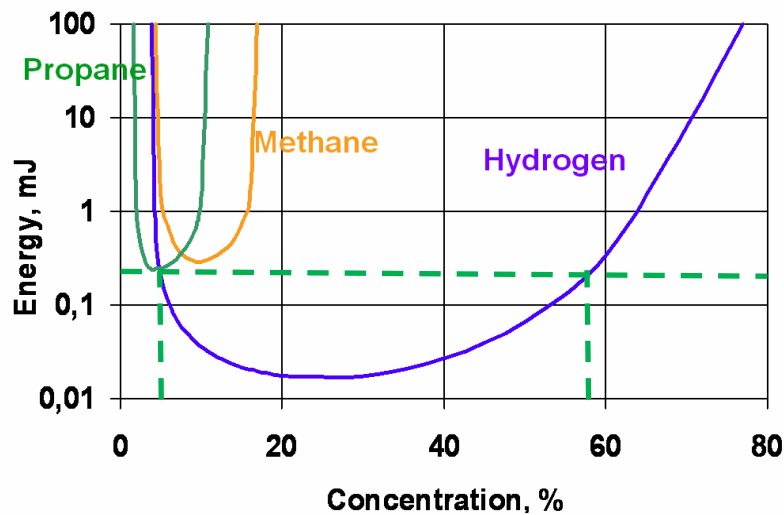


Figure 3 - Domaine d'explosivité de l'hydrogène du propane et du méthane

Le tableau 3 qui suit donne les vitesses de combustion et les énergies d'explosion comparées de l'hydrogène et du méthane.

<sup>5</sup> 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

Propriétés	Unités	Hydrogène	Propane
Domaine d'explosivité	% vol	4 - 75	2,1 – 9,5
Vitesse de combustion	cm/s	265-325	30-40
Energie d'explosion	g TNT/g produit	24	10
	kg TNT/m <sup>3</sup> gaz (à PE)	2,02	20,3

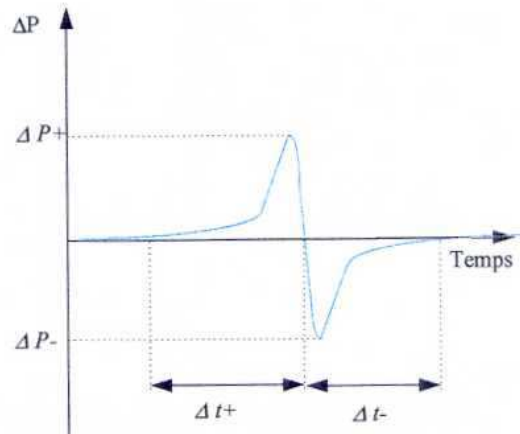
**Tableau 3** - Caractéristiques d'explosivité de l'hydrogène et du propane dans l'air à pression et température ambiantes

(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)

### 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 des gaz enflammés (effet piston). Il en résulte une augmentation continue de la surpression.



**Figure 4** - la surpression

régime de déflagration

Evolution de pour un

(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<sup>-1</sup>. En présence d'oxygène seul, cette célérité peut augmenter jusqu'à 11-12ms<sup>-1</sup>, une valeur qui peut encore être accrue dans des conditions de confinement (exemple, explosion dans une tube).

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

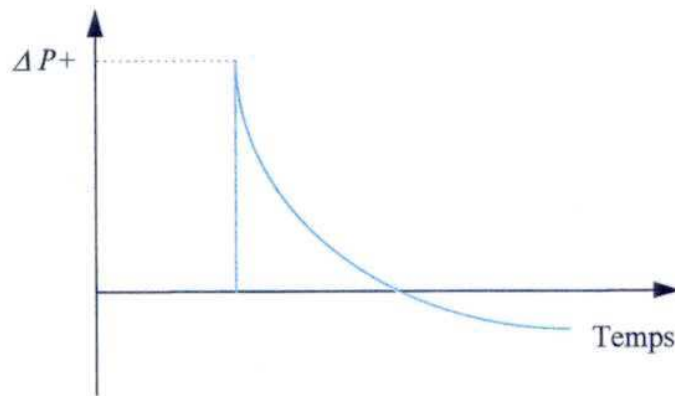


Figure 5 - Evolution de la surpression pour un régime de détonation

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

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

A noter que dans la plage entre 4% à 8 % en volume d'hydrogène dans l'air, l'inflammation du mélange donne lieu au phénomène de « flash-fire », « feu de nuage » dont le principal effet est thermique qui même en l'absence de surpression, reste néanmoins un phénomène dangereux.

### Quel régime pour quelle explosion ?

Le régime d'explosion dépend en premier lieu de la concentration de combustible dans le comburant. Dans le cas de l'hydrogène dans l'air, le régime de « flash-fire » évoqué ci-dessus se produit pour des concentrations allant de 4 à 8%. La déflagration, elle, peut se produire à partir de 8% et la détonation dans certaines configurations à partir de 11%. Des valeurs théoriques auxquelles s'ajoutent de nombreux autres paramètres. Lorsque l'explosion est amorcée, son état peut transiter de la déflagration à la détonation. Les facteurs influents sur cette transition sont 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'une explosion, un régime ou de déflagration rapide ou de détonation.

## 5. CONCLUSION

Cet ensemble de données détermine avec précision quelles sont les indispensables mesures de sécurité à prendre et à respecter pour utiliser sans danger le combustible hydrogène. Et ce, tout particulièrement dans le contexte actuel du déploiement de ce vecteur d'énergie respectueux de l'environnement qui s'avère du plus haut intérêt pour le succès de la transition énergétique. Les Fiches 7.2 et 7.3 qui suivent traitent de cette sécurité ainsi que des normes et de la réglementation qui en découlent.

### Pour en savoir plus

La combustion des gaz

<http://cs.pontdecheruy.free.fr/livres/livre2/219.htm>

Rapport d'étude ineris 22/06/2015 n° dra-13-133211-12545a

<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/dra-13-133211-12545a-evaluation-des-proba-dinflammation-v8-1442302458.pdf>