



Programme européen de formation des formateurs pour les intervenants

## Cours 8

# Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

## NIVEAU IV

### Officier spécialiste

Les informations contenues dans ce cours sont destinées au niveau d'officier spécialiste et plus.

Ce sujet est également disponible aux niveaux I & III.

Ce cours fait partie d'un ensemble de documents de formation comprenant des supports de niveaux I – IV :

Pompier, commandant d'équipe, commandant d'incident et officier spécialiste.

Veuillez consulter l'introduction du cours concernant les compétences et les attentes en matière d'apprentissage

Remarque : Ces supports sont la propriété du Consortium HyResponder et doivent être mentionnés en conséquence. Les résultats de HyResponse ont été utilisés comme base



### 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.

## Résumé

L'hydrogène s'enflamme facilement, car il présente la plus faible énergie minimale d'inflammation (MIE) parmi les combustibles connus. Il est souvent difficile d'établir la source exacte de l'inflammation de l'hydrogène et de déterminer son mécanisme spécifique. Cette conférence donne un aperçu d'incidents et de mécanismes d'inflammation d'hydrogène. Les principaux paramètres d'inflammation, tels que l'EMI et la température d'auto-inflammation, sont explorés ici. La conférence détaille les principaux types de sources d'inflammation et explique les mécanismes d'inflammation de l'hydrogène les plus courants. Une attention particulière est portée au phénomène d'inflammation spontanée pendant une libération d'hydrogène soudaine et aux facteurs qui l'affectent. Les mesures permettant d'empêcher une possible inflammation d'hydrogène et de contrôler les sources d'inflammation sont également examinées en détail dans cette conférence.

## Mots clés

Énergie minimale d'inflammation (EMI), température d'auto-inflammation, sources d'inflammation, mécanismes d'inflammation, inflammation spontanée, effet Joule-Thompson inverse, inflammation par diffusion

## Table des matières

Résumé.....	3
Mots clés.....	3
<b>1. Public cible.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Description de la mission: Spécialiste.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Niveau de compétence: Spécialiste.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Prérequis: Spécialiste.....</b>	<b>6</b>
2. Introduction et objectifs .....	7
3. Sources d'inflammation .....	8
3.1 Inflammation par décharge électrostatique.....	9
3.1.1 Une étincelle provenant d'un conducteur isolé .....	10
3.1.2 Décharge sans étincelle.....	11
3.1.3 Décharge dite CORONA .....	12
3.2 Inflammation mécanique.....	13
3.3 Inflammation par une surface chaude .....	13
3.4 Inflammation par compression adiabatique .....	14
4. Mécanismes d'inflammation de l'hydrogène.....	16
4.1 Inflammation et effet Joule-Thomson effect.....	17
4.2 Energie minimale d'inflammation (EMI).....	18
4.3 Tribo-électricité .....	20
4.4 Temperature d'auto nflammation.....	20
4.5 Inflammation pare diffusion.....	20
5. Inflammation spontanée des liberations soudaines.....	21
5.1 Mécanisme d'inflammation par diffusion.....	21
5.2 Mécanisme physique .....	27
5.2.1 Ouverture instantanée .....	27
5.2.2 Effet de la vitesse d'ouverture d'une vanne.....	28
5.2.3 Transition vers un incendie prolongé.....	29
5.2.4 Effet de separation de flame par vortex of a flame separation by vortex .....	31
5.3 Inflammation spontanée dans T-shaped PRD .....	33
5.3.1 Montage expérimental .....	33
5.3.2 Effet d'une pression de stockage .....	34
6. Prevention de l'inflammation de l'hydrogène .....	39
6.1 Classification des zones Ex .....	40

Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

6.2	Prévention de l'inflammation par étincelle électrostatique .....	41
6.3	Contrôle des sources d'inflammation thermiques et mécaniques.....	43
	Références.....	45

## 1. Public cible

Les informations contenues dans ce cours s'adressent aux officiers spécialisés et aux fonctionnaires de rang supérieur. Ce cours est également disponible pour les niveaux I : Pompier.

La description du rôle, le niveau de compétence et les attentes en matière d'apprentissage au niveau de l'officier spécialisé sont décrits ci-dessous

### 1.1 Description de la mission: Spécialiste

Les spécialistes assistent les commandants d'incidents en les conseillant et en dirigeant et supervisant les opérations techniques qui impliquent l'utilisation de connaissances, de compétences ou d'équipements liés à un risque spécifique ou à une activité d'intervention. Les incidents typiques concernent les matières dangereuses, les véhicules de transport, les événements climatiques, les défaillances structurelles et autres défaillances de l'environnement bâti, ainsi que la logistique des interventions d'urgence.

### 1.2 Niveau de compétence: Spécialiste

Une base scientifique, technique et empirique dans le domaine concerné avec des compétences, renforcées par l'expérience, pour appliquer ces informations et connaissances d'une manière interprétée et utile afin de permettre au commandant de l'incident et aux autres premiers intervenants sous la direction du spécialiste de répondre efficacement et en toute sécurité à la situation d'urgence.

### 1.3 Prérequis: Spécialiste

CEC 5 Connaissances factuelles et théoriques complètes et spécialisées dans un domaine de travail ou d'étude et conscience des limites de ces connaissances. Un éventail complet de compétences cognitives et pratiques nécessaires pour développer des solutions créatives à des problèmes abstraits. Exercer des fonctions de gestion et de supervision dans des contextes d'activités professionnelles ou d'études caractérisés par des changements imprévisibles ; examiner et développer ses propres performances et celles des autres.

## 2. Introduction et objectifs

Cette conférence fournira aux Intervenants des informations sur les possibles sources d'inflammation de l'hydrogène et les mécanismes associés, notamment le mécanisme de diffusion de l'inflammation spontanée lors d'une libération soudaine d'hydrogène. Elle couvre les principales caractéristiques liées à l'inflammation du mélange hydrogène-comburant : l'énergie minimale d'inflammation, sa dépendance par rapport à la concentration en hydrogène dans le mélange, la température d'auto-inflammation et l'effet de tribo-électricité. Cette conférence décrit également les méthodes utilisées pour la prévention de l'inflammation de l'hydrogène par une évaluation précise de la possibilité d'inflammation et l'élimination des sources d'inflammation.

Les travaux réalisés par Astbury and Hawksworth [1] en 2007 fournissent une analyse des statistiques d'incidents d'inflammation d'hydrogène et proposent certains mécanismes, notamment la génération de charges électrostatiques, l'inflammation mécanique, l'effet Joule-Thompson inverse, l'inflammation par diffusion, la compression adiabatique soudaine et l'inflammation des surfaces chaudes. Ces mécanismes seront examinés plus loin. De plus, les travaux réalisés au centre HySAFER (UU) sur l'inflammation spontanée d'une libération soudaine sont également présentés dans cette conférence. Les mesures de prévention de l'inflammation et le contrôle des sources d'inflammation sont aussi abordés dans cette conférence..

À la fin de la conférence, un Intervenant/stagiaire sera en mesure de :

- Reconnaître les différents types de sources d'inflammation ;
- Identifier les mécanismes d'inflammation de l'hydrogène selon la source d'inflammation ;
- Décrire pourquoi l'effet Joule-Thomson n'est vraisemblablement pas la source de l'inflammation de l'hydrogène ;
- Comparer les valeurs d'énergie minimale d'inflammation (EMI) et la température d'auto-inflammation de l'hydrogène à celles des autres combustibles courants ;
- Définir la dépendance de l'EMI par rapport à la teneur en hydrogène dans le mélange ;
- Expliquer l'effet de la tribo-électricité sur l'inflammation de l'hydrogène ;
- Évaluer les stades d'inflammation spontanée d'une libération soudaine d'hydrogène ;
- Reconnaître les moyens de contrôle des sources d'inflammation de l'hydrogène ;
- Classer les équipements électriques en fonction de la zone Ex ;
- Indiquer les principales mesures de prévention de l'inflammation de l'hydrogène.

### 3. Sources d'inflammation

Il est difficile de définir la source exacte de l'inflammation de l'hydrogène en raison de la faible énergie minimale d'inflammation (EMI) de l'hydrogène. Par conséquent, il est souvent compliqué de déterminer avec exactitude ce qui provoque l'inflammation de l'hydrogène et le mécanisme d'inflammation en cause. La liste des possibles sources d'inflammation est indiquée ci-dessous.

#### Sources électriques :

- Étincelles électriques (par ex. provenant d'un équipement électrique)
- Décharges statiques (par ex. dans des filtres à particules non reliés à la terre)
- Arc électrique (commutateurs, moteurs électriques, téléphones portables, téléavertisseurs et radios)
- Décharge de foudre (par ex. coups de foudre à proximité de la colonne d'évents)
- Charge électrique générée par le fonctionnement d'un équipement (compresseurs, générateurs, véhicules et autre équipement de construction)
- Courts-circuits électriques ou autre équipement électrique
- Particules électrisées

#### Sources mécaniques :

- Étincelles mécaniques (provenant de vannes se fermant rapidement)
- Choc et/ou frottement mécaniques
- Cassure du métal
- Vibration mécanique et flexion répétée

#### Sources thermiques :

- Surfaces chaudes (par ex. équipement de chauffage)
- Flammes nues
- Jets chauds
- Échappements (par ex. moteurs à combustion et cheminées d'aération)
- Charges explosives (par ex. charges utilisées dans la construction, les feux d'artifice ou les dispositifs pyrotechniques)
- Catalyseurs, explosifs et matières chimiques réactives
- Ondes de choc et/ou fragments



## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

- Ondes acoustiques et ondes de choc réfléchies ou répétées

### Autres sources :

- Rayonnement ionisant (radioactivité)
- Rayonnement électromagnétique
- Émission d'ultrasons
- Lumière (laser/éclair)
- Compression adiabatique (augmentation de pression)

L'analyse menée par Astbury and Hawksworth [1] a permis de conclure qu'il était impossible d'expliquer tous les incidents enregistrés par un seul mécanisme. Deux mécanismes potentiels ou plus peuvent agir simultanément. On sait que l'EMI des gaz et des vapeurs décroît à mesure que la température augmente [2], l'hydrogène en expansion verrait sa température augmenter en raison de l'effet Joule–Thomson inverse (examiné en détail dans la [Section 3.1](#)), ce qui réduirait son énergie d'inflammation. De même, si des particules devaient être abrasées sur les parois d'un quelconque circuit, l'énergie requise pour l'inflammation à partir d'une décharge dite CORONA serait plus faible, il est donc probable qu'un moindre courant de charge CORONA serait nécessaire pour enflammer l'hydrogène [3].

Dans plusieurs incidents, les rapports suggèrent que des effets électrostatiques pourraient avoir été en cause. En particulier, l'un des incidents n'a impliqué qu'un mince flux de mercure, sans autres sources d'inflammation potentielles à l'intérieur du système fermé. La possibilité que des gouttes et l'éclatement de bulles génèrent des charges électrostatiques a été proposée par Blanchard [4], et la capacité de telles charges à enflammer des atmosphères sensibles a été illustrée par Pratt [5].

Il est généralement reconnu que les gaz purs ne se chargent pas de manière électrostatique dans des conditions normales [3], mais cela fait généralement référence à des vitesses et des pressions faibles. Lorsque des gaz sont libérés à des pressions très élevées, l'écoulement devient sonique et la propension de survenue d'un chargement électrostatique n'est pas connue. On sait que les gaz purs n'ont pas tendance à se charger, mais on sait que les particules dans le flux de gaz se chargent de manière électrostatique [3].

Dans bon nombre de cas pratiques, le trajet d'évacuation serait probablement sinueux et non en ligne droite. Cela nécessiterait que l'hydrogène s'évacue par des coudes, ce qui pourrait amener des matières à la surface du trajet d'évacuation, par exemple, une tuyauterie, à s'éroder et à former des particules qui pourraient se charger de manière électrostatique [3].

### 3.1 Inflammation par décharge électrostatique

Il existe trois principaux types de décharge électrostatique : l'étincelle, la décharge sans flamme et décharge dite CORONA [1]. Une *décharge par étincelles* est un canal de plasma unique entre un conducteur à haut potentiel et un conducteur relié à la terre. Une *décharge sans flamme* est une décharge entre un isolant chargé et un point conducteur relié à la terre. Une *décharge*

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

*dite CORONA* est une décharge silencieuse, en général continue, avec un courant, mais sans un canal de plasma.

### 3.1.1 Une étincelle provenant d'un conducteur isolé

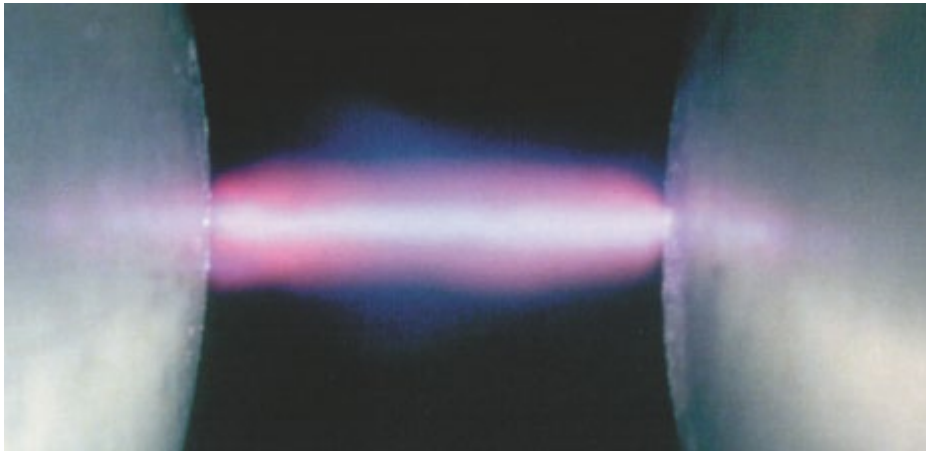


Figure 1 Spark image

L'énergie d'une décharge par étincelles provenant d'un conducteur isolé est calculée comme suit

$$(1)$$

où  $C$  est une capacité de l'élément et  $V$  est un potentiel (tension). Par exemple, une personne a une capacité  $C$  d'environ 100 pF, selon la taille corporelle, la superficie de ses pieds, et la conception et l'épaisseur des semelles de ses chaussures [1]. En supposant une EMI classique de 0,29 mJ (E) pour des mélanges hydrocarbure-air, par exemple pour un mélange propane-air, la tension requise pour produire une étincelle d'une énergie suffisante pour enflammer l'atmosphère peut être calculée comme suit :

$$(2)$$

La substitution donne  $V = 2408$  V. Pour l'air, la rigidité diélectrique est d'environ 30 kV/cm. L'espace entre le conducteur chargé et le point relié à la terre nécessaire pour qu'une décharge se produire serait d'environ  $2400/30 = 0,08$  cm (correspondant à 0,8 mm ou 800 micromètres).

D'ordinaire, les personnes ne peuvent pas sentir un choc électrostatique inférieur à environ 1 mJ et ne s'apercevraient donc pas de la possibilité d'inflammation d'un mélange hydrocarbure-air [1]. L'espace, à travers lequel l'étincelle passe d'une personne à la terre, a rarement la forme d'électrodes pointues. Classiquement, la pointe d'un doigt a un rayon d'environ 6 mm. Par conséquent, la pointe d'un doigt s'approchant d'une surface métallique plane reliée à la terre, malgré un espace de 800 micromètres présenterait une zone large, pratiquement plane, autour de la pointe au niveau de laquelle l'étincelle passerait. Cela tendrait à étouffer toute inflammation. Ce phénomène d'une étincelle n'enflammant pas un mélange inflammable entre deux plaques parallèles est examiné par Metzler [6] relativement à la prédiction de l'EMI. L'étouffement des flammes par des surfaces parallèles à proximité immédiate a également été

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

étudié par Potter [7], qui a découvert que les hydrocarbures présentent des distances d'étouffement de 2 à 3 mm.

Par conséquent, en théorie, aucune inflammation ne se propagerait à partir du canal de plasma de l'étincelle à une tension aussi « faible » que 2400 V. Avec une force de rupture de 30 kV/cm et un espace de 2 mm qui permettrait à la flamme de se propager dans le mélange hydrocarbure-air, un potentiel de 6 kV serait nécessaire pour qu'une étincelle se produise [1].

Si on prend maintenant en compte l'hydrogène, les tensions et les espaces correspondants sont bien plus faibles comparés aux hydrocarbures [1]. La rigidité diélectrique des atmosphères d'hydrogène n'est que de 17,5 kV/cm [8] et son espace d'étouffement n'est que de 0,64 mm [9]. La variation de la rigidité diélectrique avec la concentration en hydrogène dans des mélanges d'air est inconnue, mais de manière simple, elle pourrait être supposée linéaire dans une plage de concentration étroite spécifiée, de sorte que la rigidité diélectrique théorique d'un mélange environ stœchiométrique de 30 % en volume d'hydrogène dans l'air serait de  $(0,3 \times 17,5 + 0,7 \times 30) = 26,25$  kV. Avec une distance d'étouffement de 0,64 mm et une rigidité diélectrique de 26,25 kV/cm, le potentiel de décharge correspondrait à une tension de  $26,25 \times 0,064 = 1,68$  kV, ce qui correspond à une énergie stockée de  $0,5 \times [100 \times 10^{-12}] \times [1,68 \times 10^3]^2 = 1,41 \times 10^{-4}$  J, soit 0,141 mJ. Cela est plus que suffisant pour enflammer le mélange stœchiométrique d'hydrogène-air qui ne nécessite que 0,017 mJ [3].

Par conséquent, si le chargement électrostatique des personnes faisant le plein de leur véhicule avec de l'essence provoque rarement des inflammations, il est significatif que la tension nécessaire à l'inflammation de l'hydrogène est inférieure à 2 kV. Cette tension peut aisément être générée, sans qu'elles en soient conscientes, sur des personnes se tenant sur une surface isolante, il est donc possible que du personnel enflamme des fuites d'hydrogène très facilement, sans la présence d'aucune source d'inflammation apparente [1].

### 3.1.2 Décharge sans étincelle

Une décharge sans flamme se caractérise par la combinaison de nombreux canaux de plasma individuels au niveau du conducteur.

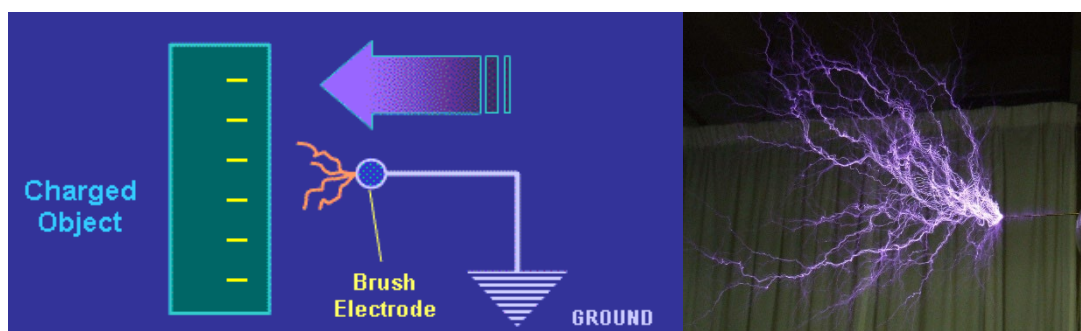


Figure 2 Schéma d'une décharge sans flamme [images Google]

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

La décharge sans flamme est illustrée sur la Figure 1. Du fait que la surface chargée est non conductrice, il est impossible de déterminer la capacité et donc l'énergie. Les travaux publiés par Gibson and Harper [10] ont introduit le terme d'« aptitude à s'enflammer » ou équivalent-énergie, ce qui signifie que, lorsque la décharge sans flamme aura la capacité à enflammer une atmosphère ayant la même énergie minimale d'inflammation qu'une étincelle, elle enflammera l'atmosphère inflammable. Il a été découvert que les équivalents-énergie classiques étaient d'environ 4 mJ pour les décharges sans flamme à partir de feuilles de polyéthylène plates. Cependant, Ackroyd and Newton [11] ont découvert que d'autres plastiques modernes et des revêtements en plastique minces sur du métal relié à la terre présentaient des équivalents-énergie supérieurs.

### 3.1.3 Décharge dite CORONA

Une décharge dite CORONA est une décharge électrique provoquée par l'ionisation d'un fluide tel que l'air entourant un conducteur portant une tension élevée. Il représente une région locale où l'air (ou un autre fluide) a subi une décharge électrique et devient conducteur, ce qui permet à la charge de s'échapper du conducteur dans l'air de manière continue. Une décharge dite CORONA survient à des endroits où la force du champ électrique (gradient de potentiel) autour d'un conducteur dépasse la rigidité diélectrique de l'air. Souvent observée comme une incandescence bleuâtre dans l'air à côté de conducteurs métalliques pointus portant de fortes tensions, elle émet de la lumière ayant la même propriété qu'une lampe à décharge. Le schéma de différentes formes de décharges dites CORONA provenant de différents objets métalliques est présenté sur la Figure 3.

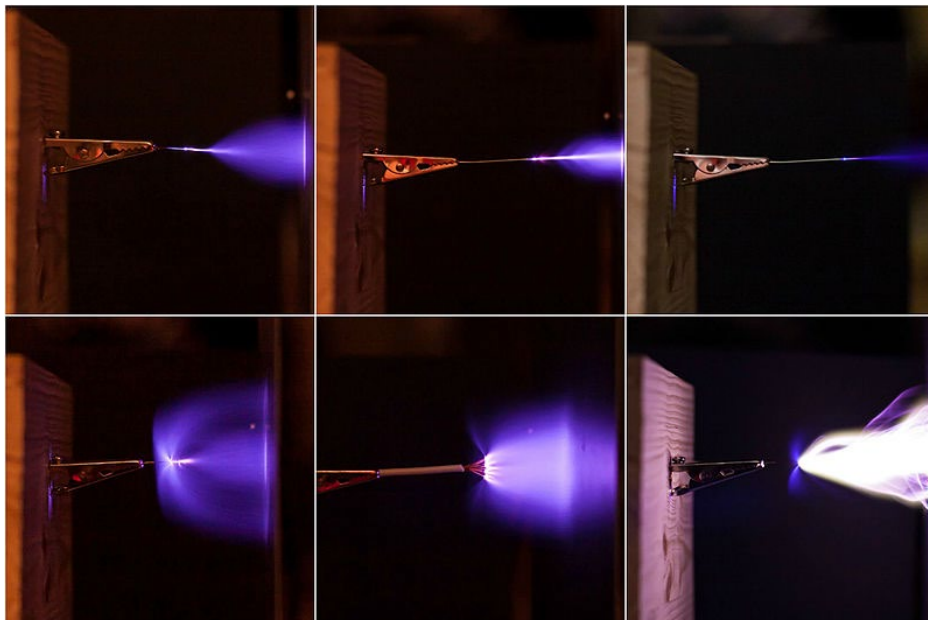


Figure 3 Différentes formes de décharges dites CORONA provenant de différents objets métalliques [Décharge dite CORONA - Wikipédia].

Une décharge dite CORONA peut enflammer un mélange hydrogène-air sans qu'il y ait une étincelle distincte ou un événement de décharge unique [1]. La tension nécessaire pour une

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

décharge dite CORONA dépend du rayon de la pointe [12]. Cross and Jean [13] fournissent une équation permettant de déterminer la tension requise pour qu'une décharge dite CORONA démarre à partir d'un point en fonction de son rayon de pointe. La prévention de l'inflammation de l'hydrogène libéré volontairement dans l'atmosphère a été appliquée précédemment en utilisant une bague toroïdale polie à l'extrémité de l'évent afin de s'assurer d'un grand rayon de pointe. En pratique, les dépôts de corrosion et de poussière sont effectivement des saillies à petit rayon, tout ce qui affecte la finition polie pourrait donc créer des saillies de faible rayon qui auraient encore un effet [1]. Des études menées il y a de nombreuses années sur les relâchements d'hydrogène ont montré que l'inflammation était rare en cas de beau temps, mais était plus fréquente pendant les orages, le grésil, les chutes de neige et les froides nuits de gelée [1].

### 3.2 Inflammation mécanique

Les principales propriétés des particules de métal en combustion ou des étincelles qui concernent leur capacité à provoquer une inflammation d'un mélange inflammable sont les suivantes :

- Taille
- Matériau
- Vitesse
- Température
- Nombre
- Vitesse et durée de combustion

Il existe une pression de contact de métal contre métal et un seuil de vitesse relative pour la production d'étincelles pendant le choc, le frottement ou le meulage. Au-dessus du seuil, des particules de métal sont perdues par le plus faible de deux matériaux. En général, les particules ne sont produites que lorsque la vitesse relative entre les deux surfaces dépasse 1 m/s [12].

### 3.3 Inflammation par une surface chaude

Ce phénomène, étant courant pour la plupart des mélanges inflammables de gaz/vapeur-air, dans la mesure où l'environnement se trouve à une température suffisamment élevée, la vitesse d'oxydation génère plus de chaleur que n'en perd l'environnement, permettant ainsi la progression de la réaction en chaîne d'oxydation [3]. C'est généralement la méthode de détermination des températures d'auto-inflammation et la valeur obtenue dépend de l'appareil utilisé. On sait que plus la température est élevée, plus le délai d'inflammation est court. Les plus faibles températures pour l'inflammation sont associées à des surfaces et des volumes importants [12]. La température d'inflammation par surface chaude est fonction de la taille caractéristique de la surface chaude. Comme illustré sur la Figure 4, l'hydrogène est représenté par la courbe étiquetée « Groupe IIC ».

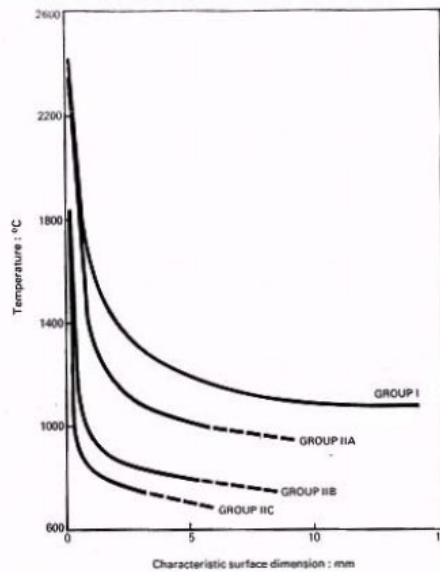


Figure 4. Température d'inflammation par surface chaude en fonction de la taille caractéristique de la surface chaude [12].

Bulewicz et al. [14] ont démontré qu'une position de plaque chaude et le mode de chauffage influent sur l'inflammation. Les auteurs ont utilisé une méthode de chauffage lent où la convection naturelle était importante et un délai entre une exposition et une inflammation était visible, en fonction de la vitesse d'augmentation de la température. L'orientation de la surface de chauffage a également affecté le délai, celui-ci étant plus long lorsque la surface chauffée était orientée vers le bas par rapport à celui dans le cas de l'orientation vers le haut de la surface chauffée. Ungut and James [15] ont également signalé que les surfaces situées en haut d'une enceinte présentaient des temps d'induction plus longs. Une surface catalytique (par ex. en Pt-platine) a un effet spectaculaire sur la température d'inflammation : des inflammations sont signalées à des températures descendant jusqu'à 70 °C (il convient de noter que la température d'auto-inflammation standard est de 510 °C [12]).

### 3.4 Inflammation par compression adiabatique

Lorsqu'il est comprimé à une entropie constante, le gaz idéal verrait la pression augmenter en raison de la compression selon la relation  $PV^\gamma = \text{const}$ . Il peut être démontré en utilisant l'équation d'état pour le gaz idéal que la relation suivante  $TV^{\gamma-1} = \text{const}$  est également valable. Par exemple, pour le taux de compression  $V_1/V_2=28$  à la température initiale de 293,15 K ( $\gamma=1.39$ ) cette relation théorique augmenterait la température à  $T_2=T_1(V_1/V_2)^{\gamma-1}=1075,2$  K, c'est-à-dire l'augmentation de température de 782 K. Cependant, dans les expériences menées par Pan et al. [16], la température mesurée réalisée par le taux de compression de 28 fois n'a été que de 149 K. Sur cette base, Astbury and Hawksworth [1] ont conclu qu'il était en pratique peu probable qu'une compression isentropique se produise. Toutefois, les travaux menés par Cain [17] indiquent que l'inflammation par compression de mélanges hydrogène-oxygène-hélium survient à une température relativement constante de 1050 K, à des vitesses d'augmentation de pression de 35-70 en commençant à 300 K à la pression atmosphérique. Le

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

calcul inverse indique qu'une augmentation de température de 300 à 1050 K nécessiterait une vitesse d'augmentation de pression de  $P_2/P_1=(T_1/T_2)^{1/(\gamma-1)} = (1050/300)^{(1,39/0,39)}=86,9$ . Par conséquent, le mécanisme de compression adiabatique nécessite une vitesse d'augmentation de pression supérieure à celle mesurée par Cain [17], suggérant la présence d'un autre mécanisme d'inflammation [1].

## 4. Mécanismes d'inflammation de l'hydrogène

En 2007, Astbury and Hawksworth ont publié un article analysant les statistiques d'incidents d'inflammation d'hydrogène et les mécanismes associés [1]. Les auteurs ont découvert que des inflammations de fuites d'hydrogène à haute pression sans raison apparente avaient été signalées et plusieurs mécanismes d'inflammation ont été proposés. Il a été souligné que bien que de nombreuses fuites se soient enflammées, d'autres fuites signalées n'ont provoqué aucune inflammation. Pour les cas où des inflammations sont survenues sans aucune source d'inflammation évidente, les mécanismes suggérés représentent principalement des suppositions et manquent d'une analyse scientifique rigoureuse. Ces travaux ont identifié les lacunes concernant la connaissance du mécanisme d'inflammation exact pour une libération d'hydrogène. Les mécanismes qui ont été envisagés par Astbury and Hawksworth [1] comprennent la génération de charge électrostatique, l'inflammation mécanique, l'effet Joule-Thompson inverse, l'inflammation par diffusion, la compression adiabatique soudaine et l'inflammation des surfaces chaudes. Ces mécanismes seront examinés ci-après dans la présente conférence.

Selon les analyses faites par le service de données sur les incidents liés aux risques majeurs du Health and Safety Executive<sup>1</sup> (Royaume-Uni), Astbury and Hawksworth [1] ont révélé 81 incidents impliquant des libérations d'hydrogène. Parmi eux, un délai entre une libération et une inflammation n'a été signalé que pour 4 cas. Les auteurs ont supposé que dans les autres cas, l'hydrogène s'était enflammé immédiatement. Dans 11 cas, la source d'inflammation était identifiée, mais dans les autres, c'est-à-dire dans 86,3 % des incidents, la source d'inflammation n'était pas claire. Quant aux libérations ne contenant pas d'hydrogène, 1,5 % d'entre elles ne se sont pas enflammées et 65,5 % des sources d'inflammation n'ont pas été identifiées. Cela valide effectivement la suggestion selon laquelle il existe une différence de propension à l'inflammation entre les gaz contenant de l'hydrogène et ceux n'en contenant pas lors de leur libération. Les incidents/accidents suivants ont été examinés par Astbury and Hawksworth [1] notamment. À la lumière des travaux entrepris par Nusselt en Allemagne, plusieurs inflammations spontanées d'hydrogène à 2,1 MPa étant évacué dans l'atmosphère ont été signalées. Il avait été indiqué que l'intérieur des cylindres de stockage présentait une certaine quantité d'oxyde de fer (c'est-à-dire de la rouille) bien que ceux-ci aient été apparemment secs et on a tout d'abord pensé qu'il existait un risque de chargement électrostatique. Cependant, les expériences sur l'évacuation d'hydrogène dans un entonnoir ouvert pourvu d'un long tuyau n'ont démontré aucune inflammation, sauf lorsque l'entonnoir était obstrué par un bouchon en fer. Le mécanisme n'a pas été compris, de sorte que d'autres essais ont été entrepris. Une décharge

---

<sup>1</sup> Ne sont pas enregistrées dans cette base de données, les libérations d'hydrogène qui se sont simplement dispersées et n'ont pas impliqué d'incendie, d'explosion ou d'autre danger important. Par conséquent, la non-inflammation signalée comme zéro n'indique pas nécessairement que toutes les libérations d'hydrogène se sont enflammées.



## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

dite CORONA n'a été observée que lorsque les tests ont été effectués dans le noir. Lorsque l'hydrogène a fui d'une bride et que le tuyau a été bouché pour mélanger la poussière, la décharge dite CORONA a augmenté. Une inflammation est survenue après le bouchage. D'autres travaux ont montré que lorsque des fils de cuivre aiguisés étaient utilisés pour favoriser les décharges dites CORONA, l'inflammation se produisait lorsque la pointe était fléchie dans le sens opposé au sens du gaz, tandis qu'aucune inflammation ne se produisait lorsque le fil était orienté dans le sens de l'écoulement [1].

Un autre incident rapporté par by Astbury and Hawksworth [1] fait référence à un cylindre d'hydrogène relié à un élément d'un appareil de laboratoire. Un technicien de laboratoire a brisé la vanne pour retirer la poussière du raccord et, ce faisant, le gaz qui s'est échappé s'est enflammé immédiatement. Bond [18] ont attribué cette inflammation au phénomène *d'inflammation par diffusion* en 1991. Aucune pression du gaz n'étant mentionnée dans cet incident, on peut supposer que la pression a été la pression de cylindre plein classique de 23 MPa. Reider et al. [19] ont testé une libération d'une grande quantité d'hydrogène pour déterminer les niveaux de pression acoustique. De l'hydrogène gazeux a été libéré à une pression initiale de 23,6 MPa et à une vitesse initiale de 54,4 kg/s, pendant une durée de 10 s. Le gaz a été transféré à travers un tuyau de 200 mm d'alésage nominal et un clapet à bille de 150 mm d'alésage dans un récipient cylindrique pourvu d'une tuyère convergente-divergente s'ouvrant sur l'atmosphère. Un essai dans lequel le gaz n'a pas été enflammé volontairement, après 10 s, le clapet de 150 mm de diamètre a été fermé et 3 s après avoir commencé à fermer le clapet, une inflammation s'est produite. Les trois mécanismes d'inflammation possibles examinés ont été : l'électrification du gaz, l'électrification des particules dans le gaz et l'abrasion par les particules métalliques d'une barre de métal soudée en travers de l'embouchure de la tuyère. Parmi eux, le premier a été écarté, car on sait que les gaz purs présentent un chargement électrostatique négligeable. Le deuxième mécanisme a été envisagé, mais le système avait été soigneusement nettoyé et purgé avant le test. Cependant, la vitesse du gaz évacué, à 1216 m/s, était bien plus élevée pendant l'essai que la vitesse utilisée auparavant, ce qui explique que ce mécanisme possible n'a pas pu être écarté. Le troisième mécanisme a été envisagé comme une possibilité, car la vitesse d'évacuation était élevée, ce qui aurait pu déloger des particules et les amener à heurter la barre. Ce mécanisme doit également être comptabilisé. Toutefois, après l'inflammation, il a été découvert que la barre avait été arrachée à une extrémité et cela a pu représenter une source d'inflammation possible, ce qui n'avait pas été prévu. De plus, l'inflammation spontanée « inattendue » de la libération d'hydrogène dans des expériences à grande échelle a également été signalée par Chaineaux et al. (1991) [20], Groethe et al. (2005) [21].

### 4.1 Inflammation et effet Joule-Thomson effect

While the sudden releases of many gases such as methane, propane and nitrogen lead to a decrease in temperature. For hydrogen, on the contrary, the temperature increases when it expands at constant Si les libérations soudaines de nombreux gaz, tels que le méthane, le

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

propane et l'azote, conduisent à une baisse de température, pour l'hydrogène, au contraire, la température augmente lorsqu'il se dilate à une enthalpie constante dans le milieu extérieur, car l'hydrogène a une température d'inversion de Joule-Thomson. Lorsque la température est supérieure à la température d'inversion de Joule-Thomson, le coefficient de Joule-Thomson devient négatif et la dilatation du gaz isenthalpique conduit à un réchauffement au lieu d'un refroidissement. Certaines sources bibliographiques indiquent que cela rend l'hydrogène plus prédisposé à l'inflammation après sa libération soudaine d'un récipient sous pression. Cependant, Astbury and Hawksworth [1] ont éliminé l'effet Joule-Thomson comme un mécanisme d'inflammation potentiel dans les expériences considérées. Ils ont établi cette conclusion en utilisant les données de Michels et al. [22] indiquant que le coefficient Joule-Thomson pour l'hydrogène, estimé pour la dilatation à partir d'une pression de 250 MPa et une température initiale de 150 °C jusqu'à 100 MPa, ne dépasse pas 0,53 K. Par conséquent, l'inflammation par ce mécanisme est très peu probable aux pressions dans la plupart des incidents examinés ci-dessus.

### 4.2 Energie minimale d'inflammation (EMI)

Énergie minimale d'inflammation (EMI) des gaz et vapeurs inflammables : quantité minimale d'énergie électrique, stockée dans le circuit de décharge avec une perte dans les fils aussi faible que possible, qui (par décharge dans un éclateur) enflamme le mélange au repos dans sa composition la plus inflammable. Une étincelle faible provoquée par la décharge d'une électricité statique depuis un corps humain peut être suffisante pour enflammer l'un quelconque des combustibles [3]. Pour une composition de mélange donnée, les paramètres suivants du circuit de décharge peuvent être modifiés pour obtenir les conditions optimales : capacité, inductance, tension de charge, forme et dimensions des électrodes, ainsi que distance entre les électrodes [12]. Outre la composition du mélange, l'EMI dépend d'autres facteurs, tels que la pression et la température initiales. Du fait que la plupart des sources d'inflammation génèrent plus de 10 mJ, presque tous les combustibles courants s'enflammeraient dans le mélange avec l'air si leur concentration dépassait la limite inférieure d'inflammabilité (LII). Les sources d'inflammation capables de former des chocs, par exemple des décharges par étincelles et des explosifs brisants, peuvent démarrer directement la détonation.

Comme illustré sur la [Figure 5](#), comparé à d'autres combustibles, l'hydrogène a la plus faible EMI, à savoir 0,017 mJ pour les mélanges hydrogène-air et 0,0012 mJ pour le mélange hydrogène-oxygène, respectivement. (Veuillez lire la conférence sur les « Propriétés de l'hydrogène relatives à la sécurité »). Comme cela a été mentionné plus haut, l'EMI est fonction de la concentration en hydrogène dans le mélange inflammable (avec l'air ou tout autre comburant). Pour un mélange combustible donné et un type d'inflammation, il existe une énergie minimale dépendante de la concentration en deçà de laquelle l'inflammation ne se produit pas. L'EMI devient infinie aux limites d'inflammabilité ([Figure 6](#)). Sur la plage d'inflammabilité des mélanges hydrogène-air, l'énergie d'inflammation varie de près de trois ordres de grandeur.

Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

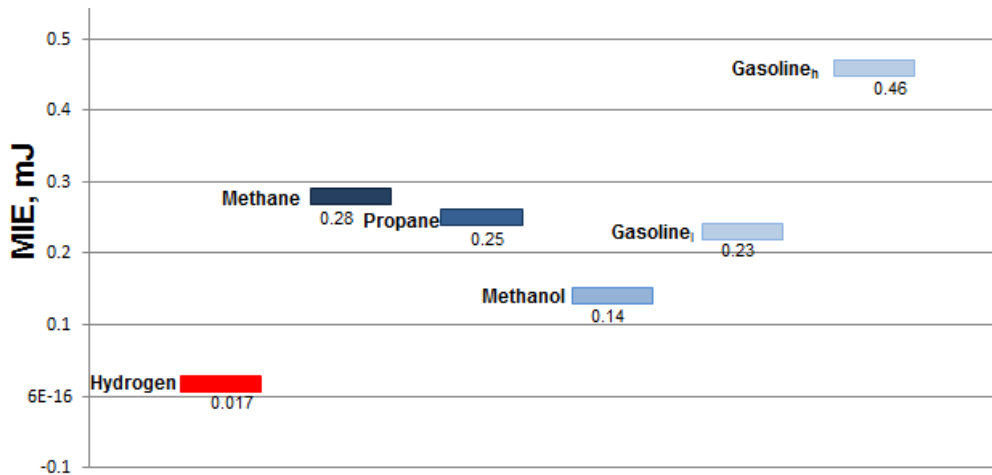


Figure 5. Les valeurs d'EMI de l'hydrogène et d'autres combustibles.

Ainsi qu'illustré sur la Figure 6, une source ayant une énergie d'inflammation de 0,24 mJ n'enflammera pas le méthane ou le propane, mais enflammera un mélange d'hydrogène et d'air dans la plage de concentration de 6,5 à 58 % en volume d'hydrogène. Une source ayant une énergie de 1 mJ enflammera un mélange hydrogène-air avec une teneur en hydrogène allant de 6 à 64 % en volume. Veuillez noter qu'aux limites d'inflammabilité, l'énergie d'inflammabilité est assez semblable pour trois combustibles. Sa valeur est relativement élevée comparée à l'EMI et de nombreuses sources d'inflammation seraient en mesure de fournir ce niveau d'énergie. Moins d'énergie est nécessaire pour enflammer un mélange qui est plus proche de sa composition stœchiométrique.

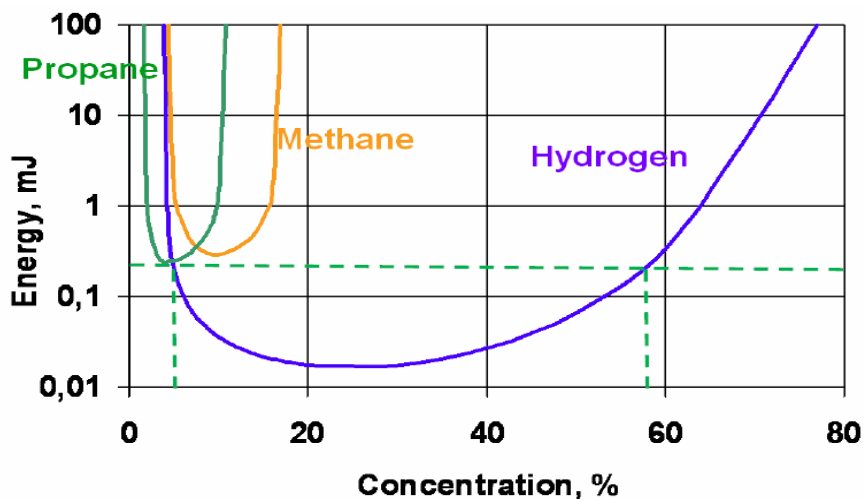


Figure 6. La dépendance de l'énergie d'inflammation par rapport à la concentration d'un combustible (hydrogène, propane ou méthane) dans l'air [23].

L'énergie stockée sous forme d'électricité statique sur un objet varie, suivant sa taille et sa capacité, de la tension à laquelle il est chargé et de la constante diélectrique du milieu environnant [3]. Pour modéliser l'effet de la décharge statique, un être humain est considéré comme un condensateur de 100 picofarads (pF), chargé à une tension de 4000 à 35000 volts.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

L'énergie totale est de l'ordre des millijoules (mJ). Les objets plus grands stockeront davantage d'énergie. Cette énergie est classiquement déchargée en moins d'une microseconde et est suffisante pour enflammer non seulement des mélanges pratiquement stœchiométriques, mais aussi les mélanges proches des limites d'inflammabilité. Certains matériaux isolants, tels que le bois, le papier et certains tissus formeront classiquement une couche conductrice qui peut empêcher l'accumulation d'électricité statique en absorbant l'eau de l'air dans les environnements où l'humidité relative est supérieure à 50 % [24].

### 4.3 Tribo-électricité

L'hydrogène est un isolant électrique à la fois en phase gazeuse et liquide. L'écoulement ou l'agitation de l'hydrogène gazeux ou liquide peut générer des charges d'électricité statique semblable à tous les liquides ou gaz non conducteurs. C'est pourquoi tout équipement transportant de l'hydrogène doit être entièrement relié à la terre. Ce n'est qu'au-dessus d'une certaine tension de « décharge » critique, où l'ionisation survient, qu'il devient un conducteur électrique [25]. Lorsqu'un flux d'hydrogène à grande vitesse accompagne la purge d'un récipient sous haute pression, cette propriété peut potentiellement être responsable de la génération d'une charge d'électricité statique des particules de tuyau par tribo-électricité, qui est un type d'électrification par contact dans lequel certains matériaux se chargent électriquement après avoir été en contact avec un autre matériau différent et sont alors séparés [3]. La probabilité d'inflammation de l'hydrogène par ce mécanisme augmente avec l'accroissement du temps de purge (c'est-à-dire le temps nécessaire pour vider un réservoir de stockage) dans les mêmes autres conditions.

### 4.4 Température d'auto-inflammation

La température d'auto-inflammation est la température minimale requise pour démarrer une réaction de combustion d'un mélange combustible-comburant en l'absence de toute source d'inflammation externe [3]. La température d'auto-inflammation standard de l'hydrogène dans l'air est supérieure à 510 °C [25]. Elle est relativement élevée comparée aux hydrocarbures à longues molécules. Cependant, cette température d'auto-inflammation peut être réduite par des surfaces catalytiques telles que le platine. Les objets à des températures allant de 500 à 580 °C peuvent enflammer les mélanges hydrogène-air ou hydrogène-oxygène à la pression atmosphérique. Les objets sensiblement plus froids à environ 320 °C peuvent provoquer l'inflammation de l'hydrogène en cas de contact prolongé à une pression inférieure à la pression atmosphérique [26]. La température d'inflammation du jet d'air chaud est de 670 °C [27].

### 4.5 Inflammation par diffusion

L'hypothèse du phénomène d'inflammation par diffusion a été posée par Wolanski and Wojcicki [28], qui ont démontré que l'inflammation survenait lorsque de l'hydrogène à haute pression était admis dans un tube à chocs rempli d'air ou d'oxygène. Ils ont découvert que l'inflammation pouvait être obtenue même si la température était inférieure à la température d'auto-inflammation de l'hydrogène. Wolanski and Wojcicki ont [28] également calculé que le

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

gaz composé d'hydrogène et d'azote (mélange à 3:1) s'enflammerait dans l'air si l'onde de choc dépassait un nombre de Mach de 2,8 à une température de 575 K. Une onde de choc de ce nombre de Mach serait produite par une pression amont de 3,9 MPa. Ils ont également calculé que l'inflammation surviendrait à un nombre de Mach inférieur de seulement 1,7 correspondant à une pression amont de 1,3 MPa lorsque l'onde de choc est réfléchi par un obstacle. Il n'est pas indiqué si la température d'auto-inflammation a été mesurée à la pression finale prévue dans le tube à chocs ou à la pression atmosphérique dans les travaux de Wolanski and Wojcicki [28]. Bien que leurs expériences avec un tube à chocs aient produit une inflammation, la température initiale était plutôt élevée à 575 K (302 °C), nécessitant une augmentation de seulement 110 K pour atteindre leur température d'auto-inflammation de l'hydrogène. Cela signifie que plus de recherches sur ce mécanisme sont nécessaires. Astbury and Hawksworth [1] ont suggéré que le mécanisme d'inflammation par diffusion n'était probable que si la température initiale était élevée. Cependant, ils ont poursuivi en indiquant que lorsque les vannes sur les cylindres ont été brièvement ouvertes directement sur l'atmosphère, vraisemblablement pour éliminer tout débris du cylindre, l'inflammation s'était produite. L'effet d'inflammation par diffusion semble être reproductible dans un tube à chocs ou dans un équipement fermé semblable. Il semble que Wolanski and Wojcicki [28] aient mené leurs travaux en utilisant exclusivement un mélange hydrogène-azote. Depuis 2007, davantage de travaux expérimentaux et chiffrés ont été réalisés sur le mécanisme de diffusion. Cela a été en partie rapporté à la Section 4 de ce cours

## 5. Inflammation spontanée des libérations soudaines

### 5.1 Mécanisme d'inflammation par diffusion

De nombreuses tentatives d'explication de l'inflammation spontanée d'une libération soudaine ont été proposées ces dernières décennies, en commençant par l'étude pionnière de Wolanski and Wojcicki [28] sur le « mécanisme d'inflammation par diffusion » examinée dans la Section 3.5. Les données expérimentales ont fourni les conditions critiques de ce phénomène. Malheureusement, elles ne peuvent pas apporter une connaissance détaillée de la dynamique du processus. Par exemple, la localisation exacte des points d'inflammation initiaux et une progression de la réaction chimique dans les tubes en aval d'un disque de rupture ou d'une vanne peuvent difficilement être identifiés par des moyens expérimentaux à des pressions élevées [3].

Il est communément accepté que la probabilité d'inflammation spontanée de l'hydrogène au niveau d'une libération soudaine depuis un équipement à haute pression est relativement élevée si des mesures d'atténuation ne sont pas en vigueur. Toutefois, il n'existe pas de références dans les codes et les normes concernant un problème d'inflammation spontanée ou relatives à une conception technique spécifique pour l'éviter ou le favoriser pour les tuyauteries, le stockage ou l'utilisation de systèmes à haute pression manipulant de l'hydrogène comprimé [3]. Le

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

contrôle de l'inflammation spontanée de libération d'hydrogène à haute pression est l'un des défis dans le domaine de la sécurité de l'hydrogène, pour lequel il existe une petite explication fondamentale.

Une preuve expérimentale d'inflammation spontanée par le mécanisme de diffusion pour les libérations depuis des équipements à haute pression dans l'atmosphère à travers un tube a été obtenue dans un « environnement de laboratoire contrôlé » par Dryer et al. [29], Golub et al. [30, 31], Pinto et al. [32] and Mogi et al. [33]. Dans ces expériences, l'hydrogène à des pressions élevées a été séparé de l'air dans un tuyau à la pression atmosphérique par un disque de rupture plat. Pour faciliter l'inflammation spontanée, différentes rallonges et différents accessoires ont été positionnés en aval d'un disque de rupture. La Figure 6 illustre des conditions critiques pour une inflammation spontanée enregistrée expérimentalement obtenue par différents groupes de recherche mentionnés ci-dessus. Les données de Dryer et al. [29] ne sont pas représentées sur la Figure 6 du fait de la géométrie interne complexe des raccords et de l'utilisation d'un disque de rupture, ce qui abaisse la pression minimale suffisant pour l'inflammation spontanée jusqu'à 2,04 MPa. Bien que les données relatives à l'inflammation spontanée de libérations par des raccords pratiques soient très utiles pour l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, les configurations internes des raccords laissent un certain nombre d'incertitudes dans la formulation des expériences chiffrées et empêchent la comparaison directe avec les résultats d'expérience d'autres groupes. Les résultats d'expérience s'accordent sur une tendance générale à la diminution de la pression (limite) critique avec une augmentation de la longueur d'un tuyau. Cependant, les conditions critiques de l'inflammation spontanée varient sensiblement en raison de la différence des montages des essais. La sensibilité de l'inflammation spontanée à différents facteurs, pas encore totalement compris, pose un certain nombre de questions qu'il faut étudier.

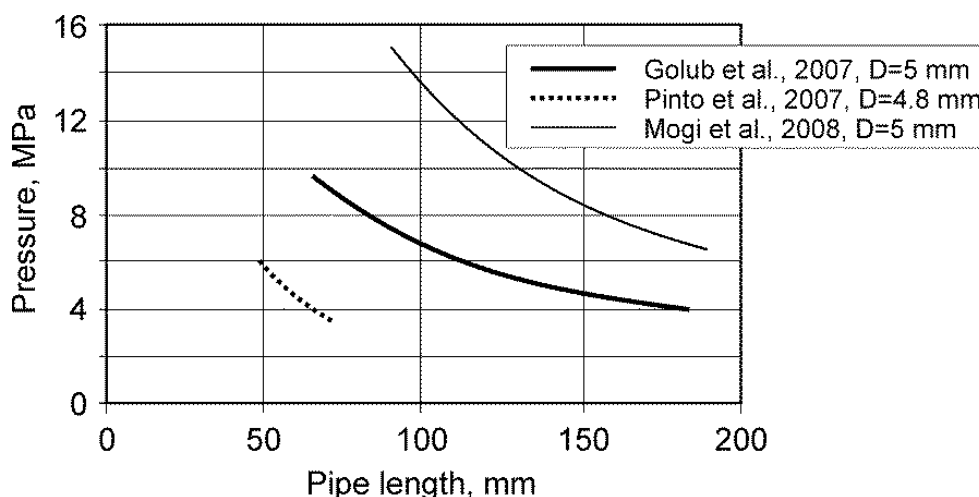


Figure 7. Pression d'«inflammation» de l'hydrogène en fonction de la longueur d'un tuyau dans des séries de tests avec disques de rupture plats [3].

La Figure 7 montre une différence essentielle des conditions critiques pour l'inflammation spontanée obtenues dans différentes études. On peut par exemple observer que pour une pression de stockage d'hydrogène de 6 MPa dans les expériences menées par Pinto et al. [32]

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

la longueur de tuyau de 50 mm est suffisante pour fournir une inflammation spontanée. Cependant, à la même pression de stockage et avec pratiquement le même diamètre interne, la longueur de canal suffisante pour fournir une inflammation spontanée dans les expériences réalisées par Golub et al. [30, 31] est de 110 mm, et dans les tests de Mogi et al. [33] la longueur minimale augmente de quatre fois, passant à 200 mm. Comment expliquer ces différences ?

Tout d'abord, Golub et al. [30, 31] ont enregistré le début de l'inflammation spontanée en surveillant la propagation du choc et la localisation du rayonnement à partir de la réaction chimique à l'intérieur du tuyau. Les conditions critiques pour l'inflammation spontanée dans leurs expériences représentent donc la distance du disque de rupture à l'emplacement où l'inflammation a été saisie par un indicateur de rayonnement. Mogi et al. [33] ont évalué la survenue de l'inflammation spontanée par une observation optique de la zone à proximité de la sortie du tuyau dans l'atmosphère. Ils ont montré que, dans certaines expériences, l'inflammation spontanée s'était produite, mais que la combustion avait été soufflée par le flux. Malheureusement, aucune condition critique pour de telles libérations n'a été indiquée. Néanmoins, ce fait confirme que toutes les libérations enflammées spontanément ne se transforment pas en jets enflammés continus. C'est un motif vraisemblable expliquant la variation de la courbe critique dans les expériences de Mogi et al. [33] comparées à celles de Golub et al. [30, 31]. Cependant, le motif le plus probable expliquant la variation des données de Mogi et al. en pressions plus élevées pour la même longueur de tuyau a été suggéré dans [3]. En effet, dans les expériences de Mogi et al. [33], la surface interne du tuyau entre le diaphragme (disque de rupture) et la sortie vers l'atmosphère a été lavée par la solution aqueuse de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (1 %) afin de permettre une visualisation de la flamme par la réaction du sodium. Cette solution aurait pu interférer avec l'écoulement de la couche limite et la chimie de la combustion de l'hydrogène et retirer une partie de la chaleur du processus. Par conséquent, le processus est survenu plus tard le long du tube pour la même pression initiale.

La procédure expérimentale appliquée par Pinto et al. [32] a été différente, car l'hydrogène a été comprimé juste avant la rupture du disque de rupture à l'aide d'un piston associé au tube à chocs. De l'azote gazeux a été injecté dans la section à haute pression du tube à chocs en amont du piston pour le pousser vers l'hydrogène gazeux afin de générer une pression d'hydrogène élevée pour rompre le disque. Cette compression a évidemment provoqué le chauffage de l'hydrogène dans la chambre à haute pression et la libération n'est pas intervenue à la température ambiante, mais à une température légèrement supérieure. Cependant, du fait que ni les mesures de température dans la chambre à haute pression ni les informations de durée pendant laquelle l'hydrogène a été comprimé ne sont disponibles, il est difficile d'estimer avec précision la température initiale de l'hydrogène.

Les résultats des expériences réalisées par Pinto et al. [32] concordent totalement avec ceux de Bazhenova et al. [34], qui ont affirmé que l'augmentation de la température initiale de l'hydrogène stimulait la survenue plus précoce de l'inflammation spontanée et à des pressions initiales inférieures. La température initiale de l'hydrogène plus élevée est la raison la plus

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

probable d'un tube plus court requis pour l'inflammation spontanée dans les expériences de Pinto et al. [32] pour la pression choisie comparé aux expériences de Golub et al. [30, 31] et Mogi et al. [33].

La manière dont le disque de rupture se rompt est probablement le facteur le plus important pour l'inflammation spontanée, car cela affecte le mélange hydrogène-air [29]. Dans les expériences examinées par Golub et al. [30, 31] les disques de ruptures ont été incisés en croix pour faciliter une ouverture nette « en pétale » à une pression prédéterminée, tandis que dans les expériences pratiquées par d'autres, on a observé une plus large distribution stochastique de la pression de rupture des disques de rupture. La nature stochastique d'une rupture de disque de rupture pratiquée de manière interne produit des variations de structure et de force de l'onde de choc générée, même à une pression de rupture constante, et peut évidemment affecter la répétabilité des données expérimentales. Une très bonne répétabilité des expériences est indiquée par Golub et al. [30, 31] tant en termes de la pression mesurée à l'arrière de l'onde de choc générée que de la pression initiale minimale, qui produiraient une inflammation spontanée à une longueur de tube fixe.

Pinto et al. [32] ont comparé les résultats pour des tubes lisses et vissés. Il a été découvert que la même pression initiale, provoquant l'inflammation spontanée dans un tube lisse, n'entraînait pas d'inflammation dans le cas d'un tube vissé. Toutefois, cette observation est en conflit avec l'opinion de Dryer et al. [29], qui ont découvert que les expériences avec plusieurs tubes raccordés ensemble produisaient une inflammation, contrairement à un tube unique (sans raccords), pour la même pression initiale, le diamètre interne et la longueur de tube globale. Ces observations soulignent que l'interaction du développement de la couche limite avec la rugosité des parois dans la section de tube, en aval du disque de rupture, peut soit favoriser soit retarder l'inflammation spontanée [3].

Dryer et al. [29] ont signalé que les événements d'inflammation spontanée sont statistiquement répartis dans une plage de pression étroite entre 2,04 et 2,21 MPa, avec une probabilité nulle de rupture de membrane aux pressions inférieures à 2,04 MPa et avec une certaine inflammation pour une rupture aux pressions supérieures à 2,21 MPa. L'étude expérimentale de Golub et al. [35] avance la possibilité d'une inflammation spontanée dans un canal en T pour une pression d'hydrogène initiale dans la plage de 1,2-2,9 MPa. Dryer et al. [29] s'interrogent sur l'importance du stade initial d'une rupture de membrane sur le mélange et le processus ultérieur d'inflammation spontanée. Ils ont conclu qu'à de faibles pressions, le temps d'inflammation chimique devient le facteur limitant, tandis qu'à de hautes pressions, le temps de mélange pour obtenir un mélange inflammable significatif limite le processus. Il est nécessaire d'éclaircir la physique de l'inflammation spontanée afin de la contrôler correctement.

Il existe également un certain nombre d'expériences [36-47] réalisées pour étudier l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression lors de sa libération soudaine. Certaines recherches se sont concentrées sur des facteurs d'influence, par ex. Mogi et al. [36] et Lee et al. [37] ont utilisé des tubes de différentes longueurs dans leurs expériences et



## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

L'hydrogène a été libéré à des pressions de stockage différentes. Ils ont découvert que l'inflammation spontanée survenait si la pression de stockage était suffisamment élevée, même si un tube plus court était utilisé. La pression de stockage minimale requise pour l'inflammation spontanée diminuait avec l'augmentation de la longueur du tube. La haute pression de stockage suffisante fournit une énergie suffisante pour produire une onde de choc de haute intensité ce qui chauffe l'air devant à une température élevée. De plus, le tube doit avoir une longueur suffisante, par conséquent une zone de mélange est générée en raison de la réflexion multidimensionnelle des chocs et des interactions entre les chocs. Toutefois, si la longueur de tube augmente au-delà d'une longueur critique, à savoir 1,2 m, selon Kitabayashi et al. [38], l'inflammation spontanée dans le mélange pourrait être éteinte dans le tube. Golovastov et al. [39] ont utilisé un tube photomultiplicateur et une diode lumineuse pour enregistrer le niveau de rupture du disque de rupture et le moment de l'inflammation spontanée. Il a été démontré que la pression initiale de l'hydrogène et la vitesse de rupture du disque de rupture influençaient l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression. Un niveau de rupture plus rapide réduit la pression de stockage minimale requise pour l'inflammation spontanée. Kaneko et al. [40] ont utilisé des disques de rupture de différents matériaux (cuivre, aluminium et laiton) de différents scores et épaisseurs (0,2 - 0,5 mm) dans leurs recherches. Ils ont indiqué que les conditions de rupture du disque de rupture étaient l'un des principaux facteurs affectant l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression. Les études du groupe de Sun à l'Université des Sciences et de la Technologie de Chine [41-43] ont porté sur l'effet de la géométrie des tubes d'aval (tubes en forme d'oméga et tubes des différents angles de flexion) sur l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression. Les résultats ont montré que les géométries internes variables des tubes d'aval induiraient une réflexion significative du choc dans le tube. La surpression du choc est supérieure comparée aux tubes droits. De plus, pour les tubes courbés, la surpression du choc est supérieure dans les tubes à plus petit angle. Par conséquent, l'inflammation spontanée est plus susceptible de survenir dans un tube à petit angle. Le rapport d'ouverture du disque de rupture a un effet significatif sur la survenue de l'inflammation spontanée. Il a été découvert que l'inflammation spontanée ne pouvait avoir lieu lorsque le rapport d'ouverture du disque de rupture était inférieur à 0,5, même si la pression de rupture atteignait 9,0 MPa [44]. De plus, la pression de rupture minimale requise pour l'inflammation spontanée diminue avec l'augmentation des dimensions du tube (L/P) [45]. Kim et al. [46] ont tout d'abord utilisé un tube avec deux fenêtres latérales pour étudier les mécanismes d'inflammation spontanée. L'étude de visualisation a montré que l'inflammation spontanée était tout d'abord intervenue au niveau de la couche limite du tube derrière le centre avant de la zone de mélange, après quoi la flamme s'est propagée en amont et en aval le long de la couche limite. L'inflammation spontanée s'est accompagnée du mélange complexe induit par la réflexion multidimensionnelle des chocs et l'interaction entre les chocs. Par ailleurs, il y a eu un seuil de pression statique critique au niveau de la couche limite pour que l'inflammation spontanée survienne. Yamashita et al. [47] ont découvert que le premier noyau était apparu à proximité de la paroi. Un autre noyau a émergé du côté externe de la paroi du tube et a

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

progressivement émergé dans l'ensemble du tube. Enfin, ces flammes se sont combinées pour former une grande région de flammes à l'intérieur du tube.

Des études chiffrées [48-57] ont également été menées. Wen et al. [48] ont indiqué que le processus de rupture fini du disque de rupture jouait un rôle très important dans l'inflammation spontanée, ce qui induisait un mélange significatif d'hydrogène et d'air au niveau de la surface de contact par la réflexion des chocs et les interactions entre les chocs. Des études paramétriques ont également été réalisées pour étudier les effets du niveau de rupture, de la pression de stockage, de la longueur du tube et du diamètre du tube sur l'inflammation spontanée et des conclusions semblables ont été obtenues. Les études du même groupe [49,50] ont examiné numériquement l'effet des géométries internes et de la plaque obstacle sur l'inflammation spontanée de l'hydrogène. Les résultats ont montré que la présence des géométries internes augmentait significativement la possibilité de l'inflammation spontanée et que la présence d'une plaque obstacle éteignait la flamme après l'inflammation spontanée. Bragin et al. [51,52] ont simulé l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression en utilisant le modèle L.E.S. et ont réussi à reproduire la séparation de la flamme hors du tube. La simulation de la rupture de la membrane a démontré qu'une couche de mélange hydrogène-air existait le long de la couche limite où l'inflammation spontanée est ensuite intervenue. Le seul modèle CFD 3D et les simulations réalisés par l'Ulster University [51,52] ont été validés en fonction des expériences d'inflammation spontanée. Terashima et al. [53] ont utilisé une forme de diaphragme initiale différente dans leur simulation et ont découvert que pour un diaphragme grandement déformé, trois événements d'inflammation étaient identifiés à l'intérieur du tube. Lee et al. [54,55] ont découvert qu'il existait une pertinence significative entre les caractéristiques d'inflammation et les conditions de rupture. Yamada et al. [56,57] ont suggéré que la forme de la surface de contact était progressivement modifiée de sphérique à plate. Puis, la surface de contact plate est devenue sphérique avec une courbure importante. De plus, trois tourbillons ont été découverts dans le tube, ce qui peut avoir un effet sensible sur le mélange de l'hydrogène et de l'air.

D'autres chercheurs ont étudié les effets de différents gaz dopant l'hydrogène sur l'apparition d'une inflammation spontanée. Rudy et al. [58,59] ont libéré des mélanges d'hydrogène-méthane et des mélanges d'hydrogène-azote à haute pression dans un tube qui était rempli d'air. Il a été découvert qu'un ajout de seulement 5 % de méthane pouvait augmenter la pression de stockage minimale à laquelle le mélange pouvait s'enflammer. Cela correspond à 2,67 fois comparé à la pression de stockage minimale de l'hydrogène pur. Quant aux ajouts d'azote, des ajouts de 5 % et 10 % de  $N_2$  peuvent augmenter de 2,12 ou 2,85 fois la pression de stockage minimale à laquelle l'inflammation spontanée survient. Golovastov et al. [60] ont étudié l'effet d'impuretés de méthane sur le délai d'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression. Il a été montré que l'ajout de 18 % (molaire) de méthane conduisait à une augmentation de 6 fois des délais d'inflammation. Malgré les recherches mentionnées ci-dessus, des données expérimentales manquent encore concernant les effets de gaz dopant l'air sur la survenue de

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression. On sait relativement peu de choses sur les propriétés des ondes de choc et les conditions d'inflammation spontanée dans ce scénario. Cette étude expérimentale tente d'étudier l'effet d'ajouts d'hydrogène sur l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression, ce qui est utile pour que nous comprenions mieux la physique et le risque de la libération d'hydrogène à haute pression et de l'inflammation spontanée. Dans l'article de Gong et al. [61], les effets d'ajouts d'hydrogène sur l'inflammation spontanée de l'hydrogène à haute pression libéré dans un mélange d'hydrogène-air ont été étudiés. L'hydrogène et l'air sont prémélangés à différentes concentrations en volume (0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 % H<sub>2</sub>) dans le tube avant que l'hydrogène à haute pression soit libéré soudainement. Des capteurs de pression sont utilisés pour détecter les ondes de choc, estimer la vitesse d'onde de choc moyenne et enregistrer la surpression d'onde de choc. Des capteurs optiques sont utilisés pour déterminer la survenue d'une inflammation spontanée d'hydrogène à haute pression dans le tube. Une caméra grande vitesse est utilisée pour saisir le comportement de propagation de la flamme hors du tube. Il a été découvert que l'ajout de seulement 5 % d'hydrogène pouvait diminuer significativement la pression de stockage minimale requise pour l'inflammation spontanée de 4,37 MPa à 2,78 MPa. Lorsque 10 % ou 15 % d'hydrogène ont été ajoutés à l'air, la pression de stockage minimale a baissé de 2,81 MPa et 1,85 MPa, respectivement. Lorsque l'ajout d'hydrogène augmente jusqu'à 20 %, l'inflammation spontanée survient même à une pression de rupture aussi faible que 1,79 MPa à l'intérieur du tube droit.

### 5.2 Mécanisme physique

#### 5.2.1 Ouverture instantanée

Le mécanisme d'inflammation spontanée par le mécanisme de diffusion est illustré sur la [Figure 8](#). Pour simplifier, les simulations ont été réalisées pour le cas d'une ouverture instantanée d'un disque de rupture séparant l'hydrogène et l'air à la même température initiale, mais à des pressions initiales différentes (hydrogène à 9,6 MPa et air à 0,1 MPa) [12].

La [Figure 8](#) montre la dynamique de la température (gauche) et la fraction molaire de l'hydrogène (droite) pendant les 56 premières  $\mu$ s après l'ouverture instantanée du disque de rupture (disque de rupture non inertiel). Au moment initial ( $t=0$ ), la limite du « disque de rupture », séparant l'hydrogène à haute pression de l'air atmosphérique, située à  $x=0$ , est retirée instantanément et une onde de choc se propage dans l'air, le chauffant du fait de la compression. L'onde de choc est suivie par une surface de contact séparant l'hydrogène froid et l'air chauffé. On observe que l'épaisseur de la couche d'air chauffé entre le front de l'onde de choc et la surface de contact augmente dans le temps [3].

L'onde de choc se propage le long du tube comme une onde plane sans courbure en dehors de la couche limite. La forme de la surface de contact passe de plane à légèrement convexe au début du fait des conditions antidérapantes au niveau des parois du tuyau. La température la plus élevée est observée dans la couche limite du fait de la baisse de la vitesse (conditions de

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

stagnation). En raison d'une contre-diffusion de l'hydrogène et de l'air au niveau de la surface de contact avec en conséquence une diffusion de chaleur depuis l'air chaud vers l'hydrogène froid à travers la surface de contact, l'inflammation spontanée survient lorsque des conditions critiques pour la réaction chimique sont atteintes. La réaction chimique se propage dans le sens de la paroi vers l'axe du tube à mesure que la surface de contact se propage en aval. 45  $\mu$ s après le début du processus à 20 mm de l'emplacement du « disque de rupture » non-inertiel, la combustion occupe toute la superficie transversale du tuyau. Le démarrage des réactions chimiques dans la couche limite accélère la propagation du front de réaction le long de la paroi comparé à la partie axiale conduisant à un changement de la forme convexe de la surface de contact dans la plus grande partie de la section transversale du tube en une forme légèrement concave [3].

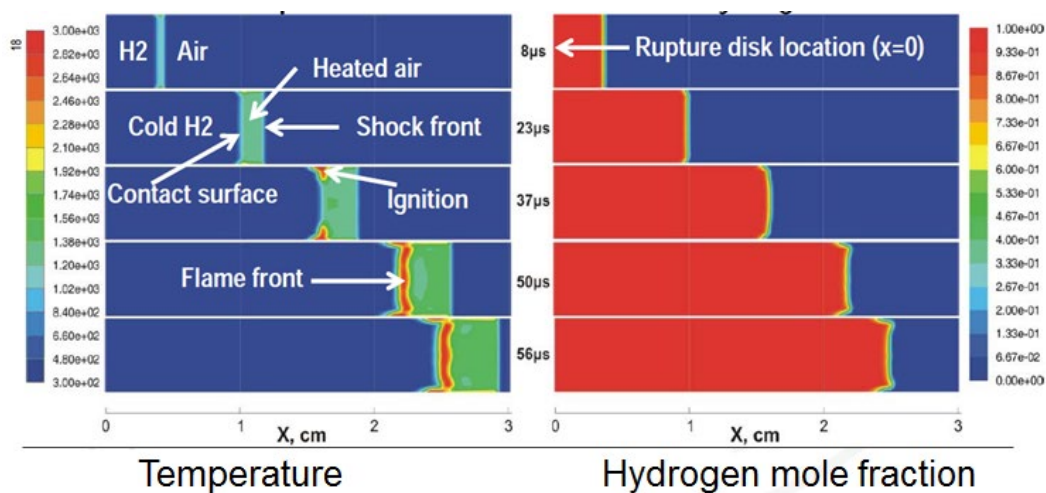


Figure 8. La dynamique d'inflammation spontanée : température (gauche) et fraction molaire de l'hydrogène (droite) [62].

### 5.2.2 Effet de la vitesse d'ouverture d'une vanne

La Figure 9 montre la dynamique de température et de fraction molaire de l'hydrogène à un stade initial de la libération d'hydrogène dans l'air dans un DD fictif avec une ouverture instantanée (gauche) et avec une ouverture inertielle (droite) du disque de rupture pour une pression initiale de 1,35 MPa dans la chambre à haute pression [63]. L'ouverture inertielle du disque de rupture s'accompagne de la formation d'un jet confiné à partir d'une zone ouverte du disque croissante avec le temps. Une structure de type tube peut être observée pour le cas d'une ouverture de membrane inertielle (Figure 9, droite). La rupture de disque inertielle entraîne une plus faible température et une forme différence de l'interface hydrogène-air comparée à l'ouverture de membrane instantanée, ce qui a amené Bragin et al. [63] à suggérer qu'une « ouverture lente, même pour les vannes rapides » éliminait parfois l'inflammation.

Le modèle de disque inertielle présentait 10 sections radiales et sa rupture a été modélisée par l'ouverture consécutive une par une de chacune des 10 sections du disque de rupture, faisant passer le diamètre du tube à un diamètre supérieur et rendant le champ de température semblable à un motif à multiples losanges, qui est caractéristique de cette plage de pressions.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

Dans le cas de l'ouverture instantanée d'une membrane non-inertielle imaginaire, la zone dans l'air chauffée par les chocs (de couleur rouge) est presque trois fois plus épaisse comparée au cas de rupture de membrane inertielle au même moment. Il est évident que l'ouverture inertielle de la membrane génère un mélange plus intense de l'hydrogène et de l'air, y compris dans la couche limite des parois de canal axiales. La température maximale dans l'air chauffé par les chocs est de 50 K plus faible pour le cas de l'ouverture de membrane inertielle. Par conséquent, la modélisation de l'ouverture inertielle du disque de rupture est une partie importante des simulations de prédiction de l'inflammation spontanée dans les géométries complexes [3].

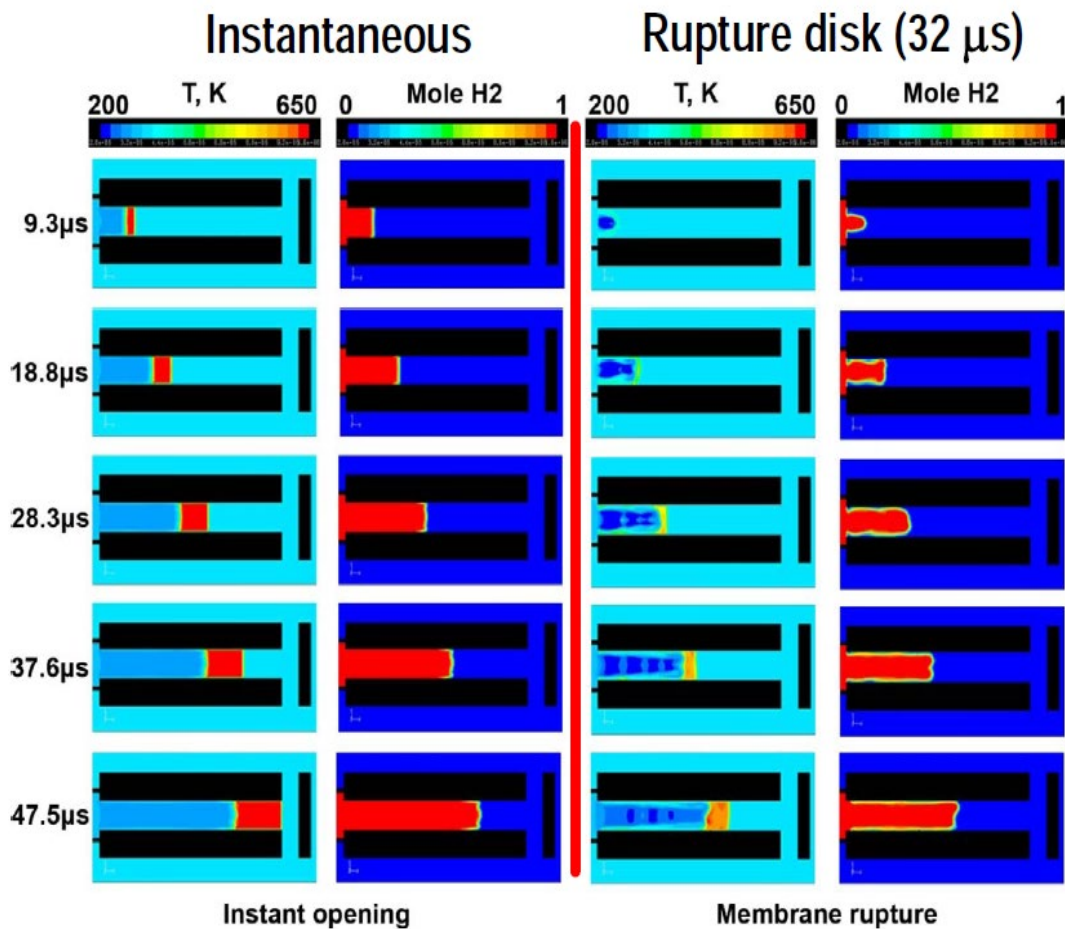


Figure 9. Dynamique de température et de fraction molaire de l'hydrogène au stade initial après une ouverture de disque de rupture instantanée (gauche) et une ouverture de disque de rupture inertielle en 10 étapes (droite) pour le cas d'une chambre à haute pression à 1,35 MPa [3].

### 5.2.3 Transition vers un incendie prolongé

Dans la série des simulations réalisées par Bragin and Molkov [64], l'attention s'est décalée de la résolution de l'inflammation spontanée vers le passage de l'inflammation dans le tuyau à la combustion hors du tuyau dans l'atmosphère. Dans cette étude, la flamme est identifiée par la fraction molaire des groupes hydroxyle OH. La concentration en hydroxyle associée à une température élevée est largement reconnue comme une indication de la survenue de la combustion. Bragin and Molkov [64] ont identifié la flamme visible par la fraction molaire d'hydroxyle supérieure à 0,001.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

La Figure 10 montre la dynamique de la température, de la vitesse et des fractions molaires de l'hydrogène ( $H_2$ ) et de l'hydroxyle (OH) dans les simulations de la libération d'hydrogène à haute pression d'un tuyau dans l'atmosphère [64]. La pression initiale de l'hydrogène choisie pour l'expérience de simulation chiffrée était de 9,7 MPa, la longueur du tuyau était de 145 mm, le diamètre du tuyau était de 5 mm. Le champ de vision de toutes les captures d'écran numériques est maintenu constant, où la longueur de canal montrée correspond à 66,5 mm et la zone extérieure au tuyau est de 148 mm de long et 130 mm de large. Toutes les captures d'écran représentent une section transversale 2D le long de l'axe du tuyau. Les valeurs maximales et minimales dans chaque série étaient fixes pour verrouiller la relation entre les couleurs et les paramètres correspondants dans toutes les images. Les valeurs minimales et maximales dans chaque série d'images ont été fixées à 0-2400 K pour la température, 0-3000 m/s pour la vitesse, 0-1 pour la fraction molaire d'hydrogène et 0,001-0,01 pour la fraction molaire d'hydroxyle. Si des valeurs tombent en dehors de ces limites, elles sont colorées selon la couleur des limites : rouge pour les valeurs supérieures à la limite supérieure et bleu pour les valeurs inférieures à la limite inférieure [3].

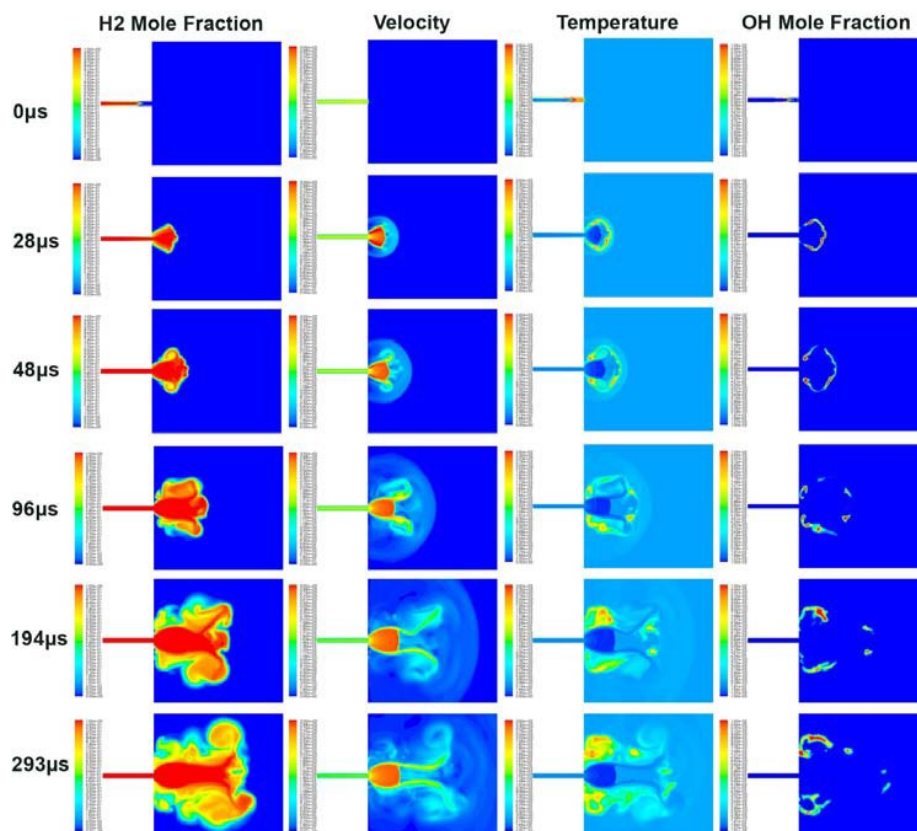


Figure 10. La dynamique de la vitesse, de la température et des fractions molaires de l'hydrogène et de l'hydroxyle en coupe 2D le long de l'axe du tuyau [64].

La pointe du front de flamme obtenue passe derrière l'onde de choc d'environ 7 mm à partir de la fin du tuyau. La largeur du front de flamme est d'environ 3 mm à proximité de l'axe du tuyau, tandis que près de la paroi elle s'étend jusqu'à 35 mm. La combustion est plus prononcée à proximité des parois et présente des régions plus larges à haute température. La première série d'images dans le temps correspond au temps de 131,5  $\mu$ s à partir de l'ouverture

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

instantanée du « disque de rupture. » Par facilité d'interprétation du processus de transition, le temps de référence a été fixé à  $0 \mu\text{s}$  à ce moment (voir la Figure 10) [3].

La Figure 10 montre que lorsque l'onde de choc émerge de la sortie du tuyau, elle subit une diffraction et passe d'une forme plane à hémisphérique. Le choc se propage vers l'extérieur et perd rapidement de sa force. Il est suivi du front de flamme poussé par l'hydrogène en expansion. Une fois que l'hydrogène quitte le tube, l'expansion démarre et le front de flamme suit l'expansion. La formation d'un disque de Mach commence peu après (voir l'image à «  $28 \mu\text{s}$  » sur la Figure 10) et l'expansion de l'hydrogène est contenue, augmentant la distance de séparation entre le choc électrique et la surface de contact. La décélération soudaine de l'hydrogène stimule un mélange turbulent et la surface de contact devient turbulente [64].

### 5.2.4 Effet de separation de flame par vortex of a flame separation by vortex

En parallèle à la formation d'un disque de Mach se forme l'écoulement annulaire extérieur à la périphérie du disque de Mach. En raison de forces visqueuses, cet écoulement annulaire supersonique génère un vortex à grande échelle qui renvoie l'écoulement vers la sortie du tuyau. La formation de vortex casse le gaz en combustion en deux parties : les parties d'aval et d'amont, voir les images de  $48 \mu\text{s}$  sur la Figure 10. La fraction molaire de radical OH (qui sert d'indicateur de réaction de combustion) et la comparaison avec les captures d'écran expérimentales sur la Figure 11 ci-dessous, qui montre une comparaison entre les captures d'écran expérimentales et simulées. La propagation chiffrée de la flamme peut être renvoyée aux dimensions expérimentales par des lignes verticales qui sont positionnées à  $10 \text{ mm}$  d'espacement. Pendant ce temps, le tube à choc n'est pas encore stabilisé. La région de combustion d'amont est repoussée par la pointe du vortex ( $96 \mu\text{s}$ ), tandis que la région de combustion d'aval à proximité de l'axe du jet est poussée vers l'extérieur. Lorsque le vortex se redresse, l'alimentation en hydrogène de la zone de recirculation s'éteint et la réduction de la vitesse de l'écoulement permet un temps d'induction nécessaire à l'intensification de la combustion. On peut observer que la combustion affecte l'évolution dynamique du gaz du jet et entraîne un écoulement non symétrique à l'axe dans une certaine mesure au-delà du disque de Mach ( $194 \mu\text{s}$ ). Le tube à choc est stabilisé aux environs de  $200 \mu\text{s}$ . Le vortex annulaire voit sa taille augmenter, accroissant la distance depuis l'axe où l'hydrogène est présent. Avant la dernière image sur la Figure 10 ( $293 \mu\text{s}$ ), l'aval par rapport à la combustion du vortex s'arrête totalement (aucun radical OH), tandis que la combustion d'amont dans la zone de recirculation est soutenue.

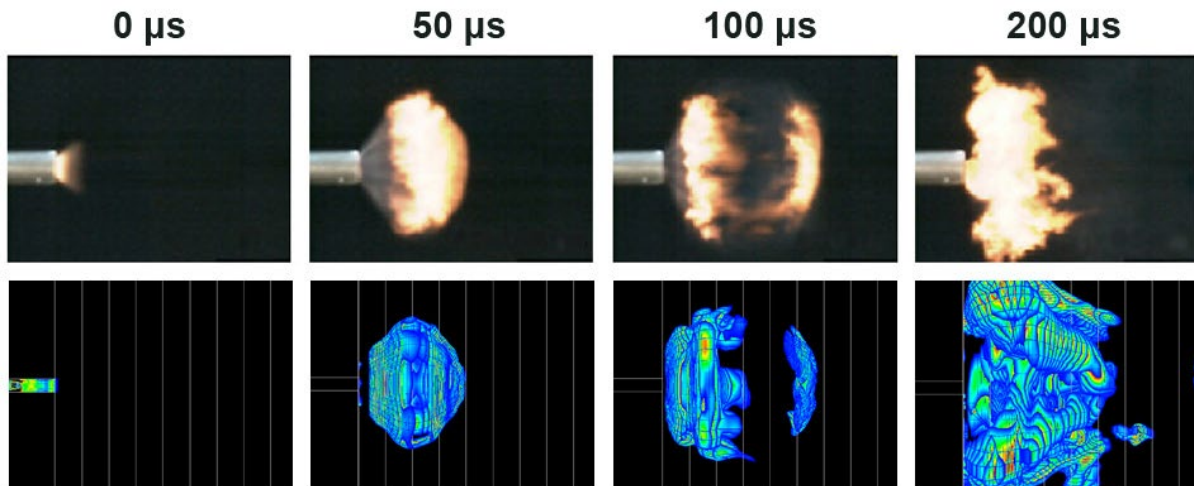


Figure 11. Photographies expérimentales par caméra vidéo grande vitesse (haut) [33] et captures d'écran 3D numériques (bas) [64].

Une séquence de photographies prises avec une caméra vidéo grande vitesse montrant la flamme sortant d'un tuyau, où une inflammation spontanée s'est produite, a été publiée par Mogi et al. [33] et reproduite sur la Figure 11. Cette séquence de captures d'écran montre la combustion d'un mélange hydrogène-air enflammé spontanément, émergeant à l'extérieur et se stabilisant à proximité de la sortie du tuyau. Les auteurs ont observé qu'une fois la flamme sortie du tuyau stabilisée à proximité de la buse, elle agit comme une flamme pilote et enflamme/entretient ensuite le jet enflammé. Par conséquent, la « stabilisation » de la flamme à proximité de la sortie du tuyau simulée de façon numérique [64] peut être considérée comme une indication du passage de l'inflammation spontanée au jet enflammé continu.

La Figure 11 montre que le jet enflammé dans le tuyau sort dans l'atmosphère à 0  $\mu$ s. Il se développe dans un cocon de mélange en combustion (50  $\mu$ s). Peu après, le vortex annulaire, qui ne peut pas être observé ici (voir la Figure 10), provoque la rupture du cocon dans les régions en combustion d'amont et d'aval (100  $\mu$ s). Lorsque la région en combustion d'aval est dispersée, la région d'amont est stabilisée à proximité de la sortie du tube (200  $\mu$ s). La taille de cette région est cependant plus grande dans les simulations. Cela peut s'expliquer par trois motifs potentiels. Tout d'abord, la limite choisie pour la visualisation numérique du front de flamme de 0,001 d'OH (souvent prise comme 0,01 d'OH). Deuxièmement, il existe des conditions différentes pour l'entraînement d'air dans l'expérience et les simulations. En effet, les simulations de libération d'hydrogène ont été réalisées non pas pour le tuyau de 5 mm de diamètre interne et de 4 mm d'épaisseur de paroi, mais pour le canal de 5 mm dans une paroi à la dimension « infinie. » Le troisième motif d'écart en termes de taille de flamme stabilisée pourrait être le mouillage de la surface intérieure du tube entre le disque de rupture et la sortie dans l'atmosphère par la solution aqueuse de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (1 %) afin de permettre la visualisation de la flamme. Cette solution pourrait avoir interféré avec le transfert de chaleur et la chimie de la combustion de l'hydrogène et diminue la taille de la flamme visible [3].



## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

On suppose, après les observations expérimentales et les simulations numériques, que le passage à la flamme de jet continue dépend en grande partie du stade de formation de jet initial, où le développement du vortex annulaire pousse le mélange en combustion d'amont dans la zone de recirculation. Une fois que la flamme est stabilisée à proximité de la sortie du tuyau, elle peut par la suite agir comme une flamme pilote pour le jet enflammé [3].

### 5.3 Inflammation spontanée dans T-shaped PRD

#### 5.3.1 Montage expérimental

La géométrie du montage expérimental, comprenant un canal en T imitant un PRD, est tirée de Golub et al. [35] et est illustrée sur la Figure 12. Le système à haute pression est constitué par un tube de 210 mm de long ayant un diamètre interne (DI) de 16 mm suivi d'un tube de 280 mm de long ayant le DI = 10 mm, à l'extrémité duquel un disque de rupture plat, en cuivre ou en aluminium présentant des entailles facilitant la rupture, est situé suivi d'un DD fictif (canal en T) ouvert sur l'atmosphère.

Le DD a un canal axial de 48 mm de long d'un DI de 6,5 mm avec une extrémité plate et deux canaux radiaux sur des côtés opposés du canal axial pour évacuer l'hydrogène dans l'atmosphère. Chaque canal radial a une longueur de 6,25 mm et un DI de 4 mm (la distance de l'extrémité reliée à l'atmosphère d'un canal radial à l'extrémité d'un autre est de 19 mm). Les canaux radiaux sont alignés avec la paroi d'extrémité de canal axial et positionnés de sorte que le bord de chaque canal radial touche tangentiellement la paroi d'extrémité plate du canal axial. L'ouverture du disque de rupture a été estimée par Golub et al. [35] comme étant d'environ dix microsecondes, créant ainsi des conditions pour un meilleur mélange de l'hydrogène avec l'air pendant l'ouverture comparé à une ouverture instantanée non réaliste. Afin d'enregistrer l'inflammation spontanée, un capteur optique a été installé le long de l'axe des canaux radiaux du DD. La température derrière l'onde de choc réfléchiée depuis la paroi d'extrémité plate a été estimée par les auteurs comme étant plus de deux fois supérieure à la température derrière l'onde de choc incidente. Golub et al. [35] ont indiqué que lorsque la pression initiale dans la chambre à haute pression ne dépassait pas 1,2 MPa, le capteur optique n'enregistre aucun signal, et lorsque la pression était de 2,9 MPa, l'inflammation était enregistrée.

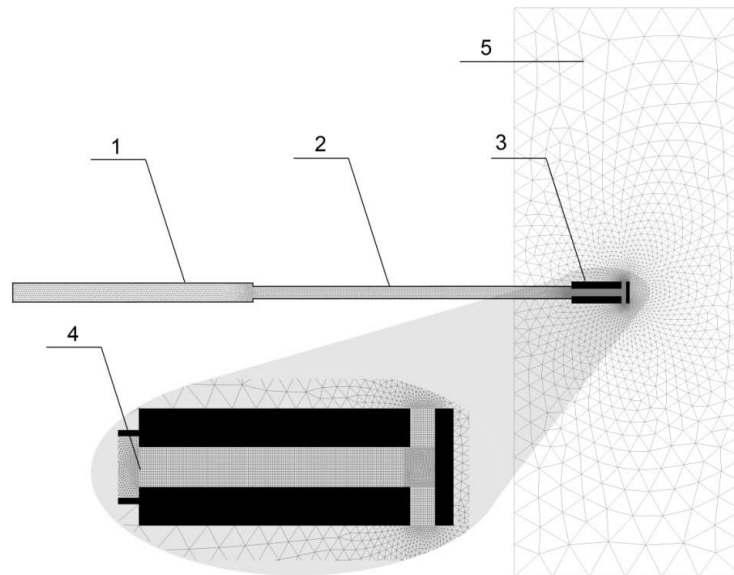


Figure 12. La géométrie et le domaine de calcul : 1 et 2 – tubes à haute pression, 3 – PRD fictif (canal en T), 4 – disque de rupture, 5 – domaine de calcul externe.

### 5.3.2 Effet d'une pression de stockage

#### 5.3.2.1 Résultats de simulation pour 1,35 MPa (sans inflammation spontanée)

La Figure 13 démontre un motif d'écoulement et fournit une vision du processus de libération d'hydrogène depuis un stockage à une pression de 1,35 MPa à travers un canal en T imitant un dispositif DD, dans lequel aucune inflammation n'a été observée. La première capture d'écran désignée « 60  $\mu$ s » montre une surface de contact entre l'hydrogène à une température proche de la température ambiante (en bleu clair) et l'air chauffé par l'onde de pression (en jaune vert) dans le canal axial horizontal. La surface de contact se situe à l'intérieur du canal axial à ce moment et est perturbée par l'instabilité de Rayleigh-Taylor. À proximité de l'extrémité plate du canal axial se trouve un volume d'air chauffé encore davantage par l'onde de choc réfléchie (en rouge). De nouvelles zones de l'air chauffé (en rouge) dans les canaux radiaux sont observées dans la capture d'écran suivante « 63  $\mu$ s », ainsi que le volume croissant de l'air chaud au niveau de l'extrémité du canal axial. Ces nouvelles zones sont probablement dues à la deuxième réflexion depuis une paroi du canal radial qui est opposée à l'extrémité plate du canal axial. Au moment des 67  $\mu$ s, l'hydrogène « froid » commence à sortir du canal axial et s'écoule le long d'un côté du canal radial. La température de l'air chaud devant l'hydrogène est réduite (voir les captures d'écran de « 67  $\mu$ s » à « 77  $\mu$ s »). On observe une chute de la température de l'air chauffé lorsque l'air chaud sort du canal radial dans l'atmosphère. L'onde de choc réfléchie est faible à une pression de stockage de 1,35 MPa et l'air chaud dans l'écoulement suivant l'onde de pression réfléchie ne peut entrer dans le canal axial (uniquement dans une faible mesure au niveau de l'axe du canal axial). Au moment égal à 77  $\mu$ s, l'hydrogène commence à sortir dans l'atmosphère et sa température chute encore pendant son expansion (bleu foncé) [12].

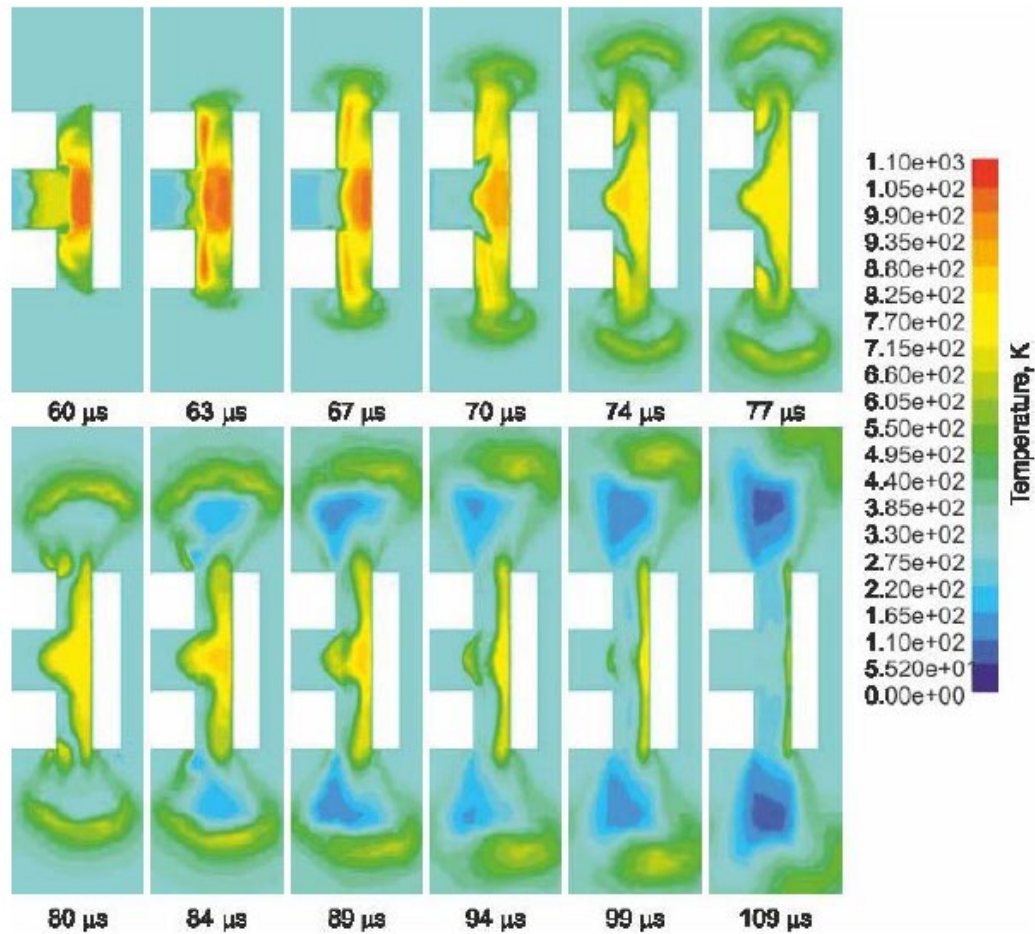


Figure 13. La dynamique de température d'une libération d'hydrogène dans un canal en T à une pression de stockage de 1,35 MPa, sans inflammation (jaune – air chauffé par l'onde de choc ; rouge – air chauffé par l'onde de choc réfléchi ; bleu clair dans le tuyau - écoulement d'hydrogène ; bleu foncé – hydrogène refroidi pendant l'expansion dans l'atmosphère) [12].

### 5.3.2.2 Résultats de simulation pour 2,9 MPa (inflammation) et pour 2,43 MPa

Les profils de température et de fraction molaire des hydroxyles dans la section transversale axiale pour le cas avec la pression initiale de 2,9 MPa dans la chambre à haute pression sont présentés sur la Figure 14. De plus, la Figure 15 montre les profils de température et de fraction molaire des hydroxyles dans la section transversale axiale pour le cas avec la pression d'hydrogène initiale de 2,43 MPa dans la chambre à haute pression.

Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

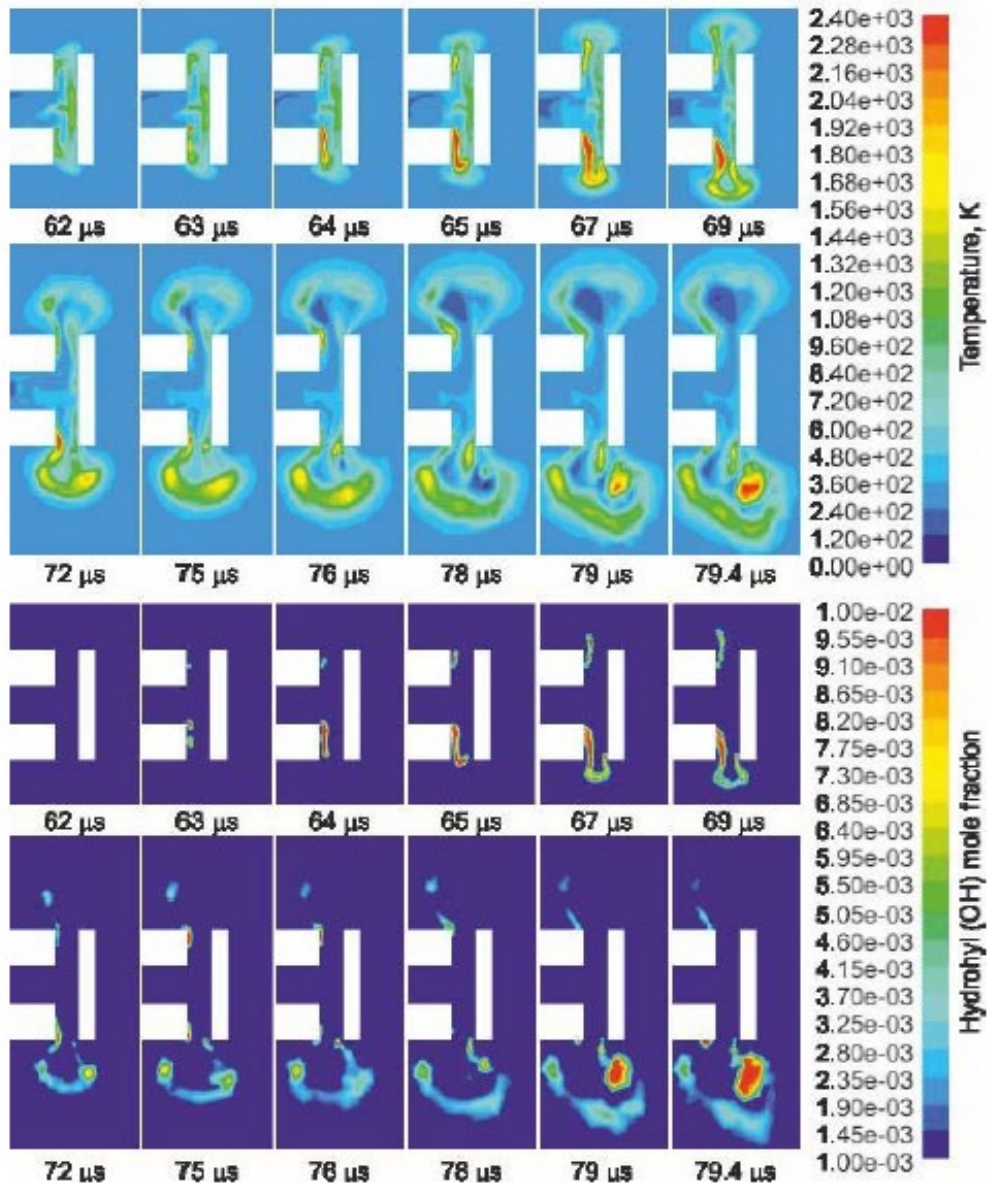


Figure 14. Température (haut) et fraction molaire des hydroxyles (bas) pour une pression de stockage d'hydrogène de 2,9 MPa.

Au stade initial de libération de l'hydrogène, la température la plus élevée est obtenue à l'endroit de la réflexion du choc électrique sur l'extrémité plate du canal axial, voir les captures d'écran pour 62 μs et 63 μs sur la Figure 14. Cependant, il est évident que l'inflammation n'est pas possible à cet endroit, car cette zone ne reçoit pas encore d'hydrogène. Une fois que l'écoulement d'hydrogène subit une diffraction autour du bord du canal axial dans les canaux radiaux, il commence à se mélanger à l'air chauffé par les chocs. Cela fournit les conditions de « triangle du feu » nécessaires (à savoir haute température combustible-comburant) pour l'inflammation du mélange hydrogène-air. On peut observer que la réaction chimique est démarrée pour le cas d'une pression de stockage de 2,9 MPa (Figure 14) et de 2,43 MPa (Figure 15) dans le canal radial à une localisation proche de la paroi d'amont et indiquée par une fraction molaire d'hydroxyle non-nulle commençant à croître à partir de 63 μs et 67 μs respectivement.

Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

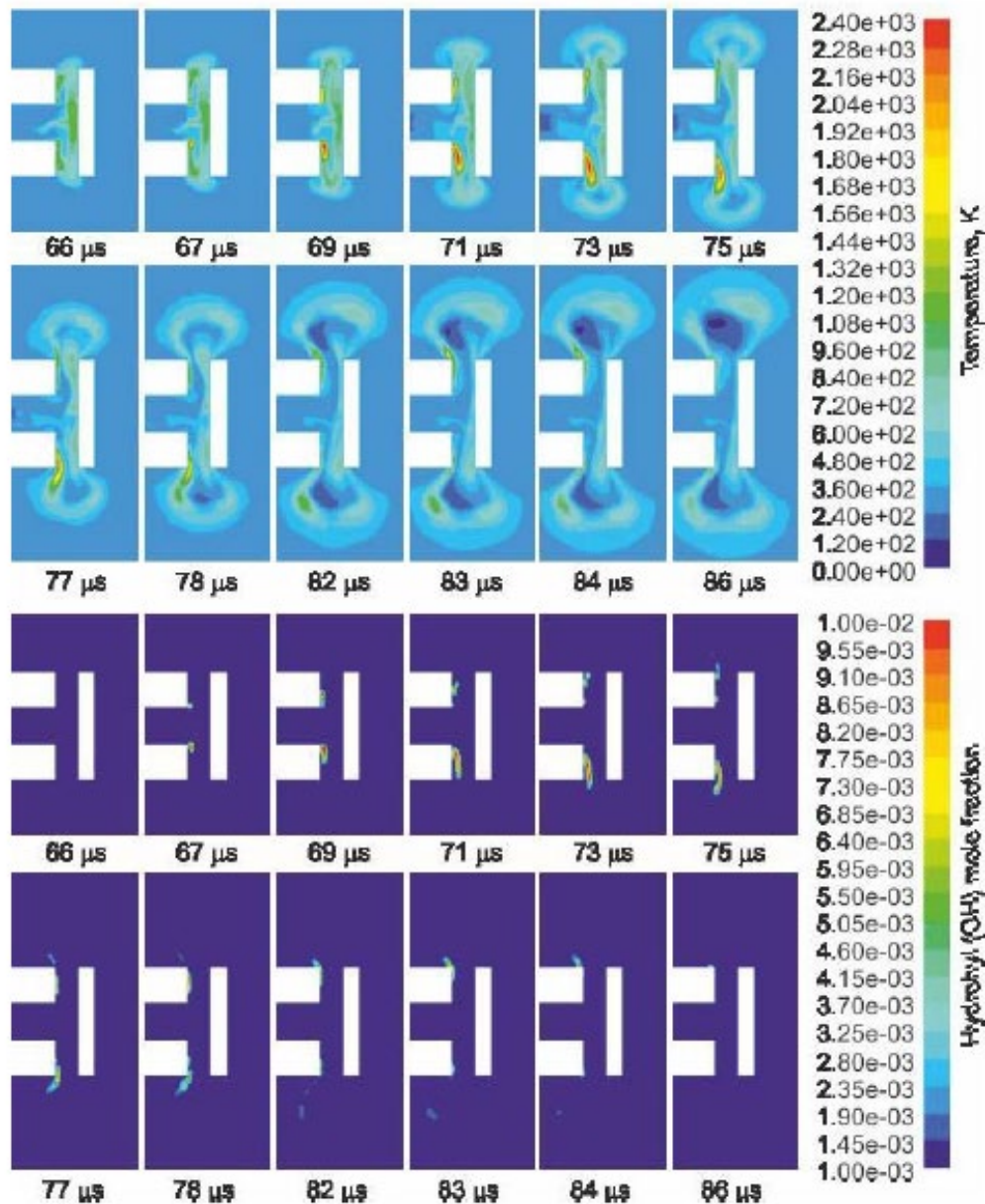


Figure 15. Température (haut) et fraction molaire d'hydroxyle (bas) pour une pression de stockage d'hydrogène de 2,43 MPa.

De grandes régions à haute température peuvent être observées pour la pression de stockage de 2,9 MPa (Figure 14) comparé à la pression de 2,43 MPa (Figure 15). La différence devient évidente lorsque le mélange en combustion est poussé vers l'extérieur. À la pression de 2,9 MPa, un cocon hémisphérique d'un mélange hydrogène-air inflammable chauffé à des conditions critiques se forme à l'extérieur du PRD et est suivi par l'hydrogène en expansion. La combustion est démarrée en plusieurs points dans le cocon (comme indiqué par les captures d'écran de la température et de la fraction molaire d'OH à 79  $\mu$ s). La concentration de l'hydrogène en ces points, en dehors du PRD, juste avant l'inflammation, se situe dans la plage entre 29 et 36 % en volume (non représentée sur la Figure). Par conséquent, il est possible de conclure que l'inflammation par le mécanisme de diffusion intervient dans la plupart des mélanges réactionnels d'hydrogène-air pratiquement stœchiométriques [12].

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

À la pression de stockage de 2,43 MPa (Figure 15), la combustion est assez faible comparée au cas d'une pression de 2,9 MPa presssure et le mélange réactionnel est entraîné avec l'écoulement d'hydrogène adjacent, ce qui conduit à l'allongement des régions en combustion. Lors de la sortie des canaux radiaux du PRD, l'écoulement subit une expansion et les régions à haute température disparaissent, arrêtant ainsi la réaction et la concentration d'OH, y compris le rôle refroidissant du jet d'hydrogène pur en expansion sur le mélange inflammable [12]. L'ensemble du processus, du démarrage de la combustion à l'auto-extinction (c'est-à-dire la disparition de la région à haute température et à fractions molaires d'OH, Figure 14), prend un peu plus de 10  $\mu$ s. Ce temps est suffisant pour enregistrer la réaction chimique par un capteur optique dans les expériences. Cela explique l'incertitude dans l'interprétation des observations expérimentales de Golub et al. [35]. En effet, à la pression de 2,9 MPa, la combustion est assez prononcée, mais à la pression de 2,43 MPa, le point d'inflammation spontanée est faible et il disparaît en raison de l'auto-extinction. Cependant, les capteurs optiques enregistrent encore un signal pendant l'inflammation spontanée. Par conséquent, en totale concordance avec l'observation expérimentale, les simulations ont confirmé l'inflammation spontanée à la pression de stockage de 2,43 MPa (qui n'est pas maintenue) [12].

La Figure 14 et la Figure 15 démontrent que le processus est asymétrique, c'est-à-dire que l'inflammation dans le canal radial supérieur est plus faible que dans le canal inférieur. À la pression de 2,9 MPa, l'inflammation survit à l'expansion uniquement depuis le canal radial inférieur, tandis que la partie supérieure est éteinte. Cela est recherché en raison de l'ouverture asymétrique du disque de rupture dans les simulations. Les résultats soutiennent la conclusion précédente concernant la sensibilité de l'inflammation spontanée au processus de rupture du disque de rupture qui devrait être étudiée davantage, ainsi que les effets d'autres facteurs tels que l'humidité de l'air, etc. [12]. Des informations plus détaillées sur l'inflammation spontanée dans un PRD en T peuvent être consultées dans [3].

## 6. Prévention de l'inflammation de l'hydrogène

Les sources d'inflammation doivent être correctement éliminées ou isolées et les opérations sur les installations PCH devraient être menées comme si des sources d'inflammation imprévues pouvaient survenir. Des méthodes de mise à la masse (mise à la terre) devraient être établies pour minimiser le risque de décharge statique et la possibilité de coups de foudre en extérieur. La capacité des matériaux choisis pour l'utilisation dans les environnements d'hydrogène à décharger l'électricité statique devrait être évaluée. Les matériaux isolants, tels que le bois, le papier et certains tissus formeront classiquement une couche conductrice qui peut empêcher l'accumulation d'électricité statique en absorbant l'eau de l'air dans les environnements où l'humidité relative est supérieure à 50 %. Il est possible de consulter les pratiques recommandées pour les méthodes de mise à la terre afin d'empêcher les décharges statiques dans différentes normes nationales et internationales qui couvrent l'installation des équipements électriques dans les environnements dangereux. Les équipements électriques choisis pour une utilisation dans les environnements d'hydrogène peuvent également être une source d'étincelles ou de génération de chaleur et il conviendra de veiller à respecter les normes électriques nationales et internationales en vigueur pour l'installation.

Il existe plusieurs manières d'éliminer ou au moins de réduire le risque d'inflammation. Health and Safety Executive (Royaume-Uni) a compilé la liste des mesures préventives suivantes [65] :


- Utilisation d'équipements électriques adéquats (à savoir les équipements classés pour la zone dans laquelle ils sont situés). Les équipements mécaniques doivent être choisis d'une manière semblable.
- Mise à la terre de tous les équipements avec une installation.
- Élimination des surfaces présentant une température supérieure à la température d'auto-inflammation des matériaux inflammables stockés/utilisés.
- Fourniture d'une protection contre la foudre.
- Choix correct des véhicules/moteurs à combustion interne qui peuvent fonctionner dans des zones réglementées.
- Choix correct des équipements pour éviter les sources de rayonnement électromagnétique de haute intensité, par exemple limitations de la puissance absorbée dans les systèmes à fibre optique, évitement des lasers de haute intensité ou des sources de rayonnement infrarouge.
- Interdiction de fumer/d'utiliser des allumettes ou des briquets.
- Contrôle de l'utilisation des véhicules réguliers.
- Contrôle des activités qui créent les zones de danger intermittentes, par exemple le chargement/déchargement des pétroliers.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

- Contrôle des activités de maintenance qui peuvent provoquer des étincelles/surfaces chaudes/flammes nues par un système de permis de travail.
- Précautions pour contrôler le risque de l'échelle pyrophorique, généralement associé à la formation de sulfure de fer à l'intérieur de l'équipement de traitement

### 6.1 Classification des zones Ex

La description de la classification des zones Ex des équipements et la fréquence des fuites (en heures par an) sont indiquées dans le Tableau 1. Les équipements utilisés dans la Zone 0 doivent être intrinsèquement sûrs. Ils doivent être certifiés par un organisme notifié pour obtenir le marquage. Un entretien régulier est requis pour garantir que les équipements demeurent intrinsèquement sûrs..

Table 1. Ex-zone  classification.

Zone	Description	Frequency
0	An area where an explosive gas atmosphere is present continuously or for long periods	>1000 h/a
1	An area where an explosive gas atmosphere is likely to occur in normal operation	>10 h/a but <1000 h/a
2	An area where an explosive gas atmosphere is not likely to occur during normal operation, or if it occurs will only exist for a short period	<10 h/a
No zone	Safe area	No Ex-Atmosphere present at any time

Les équipements électriques peuvent représenter une source d'inflammation. Le principal principe de prévention consiste à limiter la présence de sources d'inflammation dans les endroits/zones dangereux. Si cela n'est pas possible, trois méthodes de protection fondamentales sont utilisées pour garantir la sécurité et le respect de la réglementation:

1. Confinement des explosions. Cette méthode autorise la survenue de l'incendie ou de l'explosion, mais le/la confine à une zone bien définie. Cela a pour but d'éviter la propagation des conditions dangereuses à une atmosphère environnante. Il est possible d'utiliser :
  - Une enceinte résistante aux explosions, l'explosion restera confinée dans une enceinte spécialement conçue pour résister à la surpression. Elle est applicable aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0, et référencée avec le symbole Ex 'd'
2. Séparation. Cette méthode tente de séparer ou isoler physiquement des pièces électriques ou des surfaces chaudes du mélange explosif. Il est possible d'utiliser:



## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

- Une méthode de protection de la pressurisation, lorsqu'un gaz protecteur est contenu à l'intérieur d'une enceinte afin de maintenir une pression légèrement plus élevée que dans l'atmosphère extérieure. Elle est applicable exclusivement aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0, et référencée avec le symbole Ex 'p'.
  - Une méthode de protection par encapsulation lorsqu'une résine est utilisée pour séparer des pièces électriques. Elle est applicable exclusivement aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0, et référencée avec le symbole Ex « m. »
  - Une méthode de protection par immersion dans l'huile lorsque toutes les pièces électriques sont immergées dans de l'huile. Elle est applicable exclusivement aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0, et référencée avec le symbole Ex « o. »
  - Une méthode de protection par remplissage pulvérulent lorsqu'une matière pulvérulente (en général une poudre de quartz) est utilisée pour séparer des pièces électriques. Elle est applicable exclusivement aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0, et référencée avec le symbole Ex 'q'.
3. Prévention. Il s'agit d'une méthode qui limite le contenu énergétique, tant électrique que thermique, à des niveaux sûrs à la fois dans un fonctionnement normal et dans des conditions de défaillance. Il est possible d'utiliser :
- Une méthode de protection de sécurité accrue lorsqu'un appareil électrique est conçu pour empêcher la génération des températures, étincelles et arcs excessifs à l'intérieur et à l'extérieur de l'appareil dans des conditions normales. Elle est applicable exclusivement aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0, et est référencée avec le symbole Ex « e. »
  - Méthode de protection de sécurité intrinsèque. Il existe une limitation de l'énergie stockée dans un circuit électrique le rendant incapable de générer des arcs, des étincelles ou des effets thermiques pouvant enflammer une explosion de mélange hydrogène-air, à la fois lors d'un fonctionnement normal et dans des conditions de défaillance spécifiques. Le type de protection étiqueté Ex « ia » est applicable aux équipements situés dans des Zones 0, 1 et 2, tandis que celui étiqueté Ex « ib » est applicable exclusivement aux équipements situés dans des Zones 1 et 2, mais non dans une Zone 0 [66].

### 6.2 Prévention de l'inflammation par étincelle électrostatique

L'hydrogène appartient aux Groupe IIC des gaz inflammables. Le Comité européen de Normalisation électrotechnique [67] limite la largeur des matériaux étroits (tuyaux, gaines de câble, etc.) en fonction des zones et des catégories de gaz, qui sont indiquées dans le [Tableau 2](#).

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

Tableau 2. Restrictions du CENELEC sur la largeur des matériaux étroits.

Zone	Maximum width, cm		
	Group IIA	Group IIB	Group IIC
0	0.3	0.3	0.1
1	3.0	3.0	2.0
2	Pas de limite	Pas de limite	Pas de limite

Le CENELEC a également imposé des restrictions sur les surfaces pouvant être chargées, en fonction des zones et des catégories de gaz, qui sont indiquées dans le Tableau 3. Ce document restreint les zones des matériaux isolants qui peuvent se charger et limite la charge maximale qui peut être transférée depuis la surface sous la forme d'une décharge sans flamme (la charge tolérable maximale transférée pour l'hydrogène est de 10 nC).

Tableau 3. Restrictions du CENELEC sur la surface pouvant être chargée.

Zone	Maximum area, cm <sup>2</sup>		
	Group IIA	Group IIB	Group IIC
0	50	25	4
1	100	100	20
2	Pas de limite	Pas de limite	Pas de limite

La prévention de l'inflammation de l'hydrogène, volontairement évacué dans l'atmosphère, peut être appliquée en utilisant une bague toroïdale polie dans l'extrémité de l'évent. En pratique, les dépôts de corrosion et de poussière sur de telles bagues sont effectivement des saillies à petit rayon [12]. Le contrôle de l'électricité statique peut nécessiter de changer la matière des salopettes des employés et l'adoption de chaussures antistatiques. De plus, des dispositifs fonctionnant sur batterie, tels que des radios, des téléphones portables, des caméras sont également envisagés comme des sources d'inflammation potentielles [12].

Différentes directives telles que [68] et [69] décrivent les méthodes pour empêcher la génération et l'accumulation de charge, et la décharge électrostatique ainsi que requis par l'ATEX [70]. Elles comprennent les méthodes suivantes :

- Éviter ou limiter la génération de charge : pour un liquide non conducteur, tel que l'hydrogène liquide, il est recommandé de ne pas dépasser des vitesses de transport de 1 m/s en augmentant le diamètre ou en réduisant le débit.
- Éliminer ou diminuer l'accumulation de charge : cela peut être effectué en évitant d'utiliser des matériaux isolants, mais aussi en mettant à la terre et en reliant les éléments de l'installation.
- Mesures organisationnelles : le contrôle de l'électricité statique dépend de la formation du personnel impliqué, ainsi que mentionné dans ATEX 137 [70].

### 6.3 Contrôle des sources d'inflammation thermiques et mécaniques

L'inflammation du mélange hydrogène-air peut être provoquée par une surface chaude. Pour l'hydrogène, la température des surfaces chaudes ou des points chauds ne doit pas dépasser 585 °C, même pour quelques mm<sup>2</sup> d'après les expériences menées dans le cadre du projet européen MECHEX (veuillez noter que la température d'auto-inflammation de l'hydrogène, 510 °C, reste inférieure à celle spécifiée ci-dessus).

La séparation physique des sources d'inflammation, telles que le soudage, les flammes ou le travail à chaud, est préférable. Une classification supplémentaire des équipements électriques se fonde sur la température de surface maximale des appareils à la pression atmosphérique indiquée dans le [Tableau 4 \[71\]](#). Tout type d'appareil de T1 à T6 peut être utilisé dans un mélange inflammable d'hydrogène-air.

Tableau 4. Classification des appareils électriques suivant leur température de surface maximale [71].

Catégorie de température	Température de surface maximale, en °C
T1	450
T2	300
T3	200
T4	135
T5	100
T6	85

L'inflammation mécanique est généralement due à un stress mécanique dans des conditions anormales ou de défaillance (c'est-à-dire un frottement, une abrasion et un impact ou une combinaison de ces facteurs) et est généralement constituée par trois étapes : génération de chaleur, transfert de chaleur à l'atmosphère explosive environnante et enfin l'inflammation elle-même [66]. Le contrôle de l'inflammation mécanique requiert une conception minutieuse des équipements par l'un des moyens suivants :

- Limiter la vitesse de rotation,
- Fournir une distance suffisante entre des parties fixes et rotatives,
- Paramétrer des capteurs de température.

L'énergie produite par l'impact peut être aussi faible que deux Joules et est suffisante pour enflammer un mélange hydrogène-air. Pour éviter l'inflammation provoquée par l'impact, il est nécessaire de [66] :

- Utiliser des outils antiétincelles appropriés,

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

- Purger l'hydrogène avant toute intervention
- Éviter le contact entre l'aluminium et l'acier.

Les travaux à chaud présentent des similitudes avec l'inflammation mécanique, mais ne sont pas provoqués par une défaillance mécanique du processus, mais par une activité humaine. Il est nécessaire d'empêcher tout accident/incident ainsi provoqué par [66] :

- Fourniture d'un « Permis de Travail à Chaud, »
- Formation adaptée du personnel concerné,
- Fourniture d'équipements de lutte contre l'incendie adéquats,
- Coupure de l'alimentation en gaz pendant l'intervention,
- Purge des équipements avant l'intervention.

## Références

1. Astbury, GR and Hawksworth, SJ (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2178-2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A and Maddison TE (1974). An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons. *Combustion and Flame*. Vol. 23, pp. 203-213.
3. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II*. Available from: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), free download e-book.
4. Blanchard, DC (1963). Electrification of the atmosphere by particles from bubbles in the sea. *Progress in Oceanography*. Vol. 1, pp. 71–202.
5. Pratt, TH (1993). Electrostatic ignitions in enriched oxygen atmospheres: a case history. *Process Safety Progress*. Vol. 12, pp. 203-205.
6. Metzler, AJ (1952). Minimum ignition energies of six pure hydrocarbon fuels. NACA Report RM E52 F27.
7. Potter, AE (1960). Flame quenching. *Progress in Combustion Science and Technology*. Vol. 1, pp. 145–181.
8. Cassutt, L, Biron, D and Vonnegut B (1962). Electrostatic hazards associated with the transfer and storage of liquid hydrogen. *Advances in Cryogenic Engineering*. Vol. 7, pp. 327–35.
9. ISO/TR 15916 (2004). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
10. Gibson, N and Harper, DJ (1988). Parameters for assessing electrostatic risk from non-conductors - a discussion. *Journal of Electrostatics*. Vol. 21, pp. 27–36.
11. Ackroyd, GP and Newton, SG (2003). An investigation of the electrostatic ignition risks associated with a plastic coated metal. *Journal of Electrostatics*. Vol. 59, pp. 143–51.
12. HyFacts Project. Chapter IM. Hydrogen ignition mechanisms. Prevention and mitigation of ignition. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [accessed on 23.11.20].
13. Cross, S and Jean, A (1987). *Electrostatics principles, problems and applications*. Bristol: Adam Hilger.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

14. Bulewicz, EM, et al. (1977). Zapłon mieszaniny wodorowo-tlenowej od gorącej powierzchni [The ignition of hydrogen–oxygen mixtures from a hot surface]. *Archiwum Termodynamiki i Spalania*. Vol. 8(1), pp. 85–93.
15. Ungut, A and James, H (2001). Autoignition of gaseous fuel-air mixtures near a hot surface. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*. Vol. 148, pp. 487–502.
16. Pan, L, Fisher, SA, Jayanti, S and Hewitt, GF (1995). Measurement and prediction of temperature rise following sudden compression in a high-pressure pipeline. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. Vol. 73 (Part B), pp. 18–20.
17. Cain, TM (1997). Autoignition of hydrogen at high pressure. *Combustion and Flame*. Vol. 111, pp. 124–32.
18. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products*. Oxford: Butterworth Heinemann.
19. Reider, R, Otway, HJ and Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion. *Pyrodynamics*. Vol. 2, pp. 249-261.
20. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G and Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 134, pp. 104-137.
21. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y and Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Hydrogen Safety*, 8-10 September 2005, Pisa, Paper 120105.
22. Michels, A, de Graaf, W and Wolkers GJ (1963). Thermodynamic properties of hydrogen and deuterium between 175°C and 150°C and at pressures up to 2500 atmospheres (Part A). *Applied Science Research*. Vol. 12, pp. 9–32.
23. Schmidchen, U (2009). Hydrogen safety facts and myths. 3<sup>rd</sup> International Short Course and Advanced Research Workshop “Progress in Hydrogen Safety”, Belfast, 27<sup>th</sup> April-1<sup>st</sup> May 2009, Northern Ireland, UK.
24. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
25. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Available from: [www.hysafe.org](http://www.hysafe.org) [accessed on 23.11.20].
26. Baratov, AN, Korolchenko, AY and Kravchuk, GN (Eds.) (1990). *Fire and explosion hazards of substances and materials*. Moscow: Khimia. 496 p., ISBN 5-7245-0603-3 part 1, ISBN 5-7245-0408-1 part 2 (in Russian).

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

27. NASA (1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Technical report NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington. Available from: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> was cancelled on July 25 2005 [accessed 13.05.14].
28. Wolanski, P and Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere. Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 14, pp. 1217-1223.
29. Dryer, FL, Chaos, M, Zhao, Z, Stein, JN, Alpert JY and Homer, CJ (2007). Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air. Combustion Science and Technology. Vol. 179, pp. 663-694.
30. Golub, VV, Baklanov, DI, Bazhenova, TV, Bragin, MV, Golovastov, SV, Ivanov, MF and Volodin, VV (2007). Hydrogen auto-ignition during accidental or technical opening of high pressure tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 20(4-6), pp. 439-446.
31. Golub, VV, Baklanov, DI, Golovastov, SV, Ivanov, MF, Laskin, IN, Saveliev, AS, Semin, NV and Volodin, VV (2008). Mechanisms of high-pressure hydrogen gas self-ignition in tubes. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 21(2), pp. 185-198.
32. Pinto, D, Aizawa, K, Liu, YF, Sato, H, Hayashi, AK and Tsuboi, N (2007). Auto-ignition of high pressure hydrogen release. Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 23-27 July 2007, Poitiers, France.
33. Mogi, T, Kim, D, Shiina, H and Horiguchi, S (2008). Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 21(2), pp. 199-204.
34. Bazhenova, TV, Bragin, MV, Golub, VV and Ivanov, MF (2006). Self-ignition of a fuel gas upon pulsed efflux into an oxidative medium. Technical Physics Letters. Vol. 32(3), pp. 269-271.
35. Golub, VV, Volodin, VV, Baklanov, DI, Golovastov, SV and Lenkevich, DA (2010). In: Physics of Extreme States of Matter, ISBN 978-5-901675-96-0, Chernogolovka, 2010, pp.110-113.
36. Mogi T, Wada Y, Ogata Y, Hayashi AK (2009). Self-ignition and flame propagation of high-pressure hydrogen jet during sudden discharge from a pipe. Int J Hydrogen Energy 34:5810-5816.
37. Lee HJ, Kim YR, Kim S-H, Jeung I-S (2011). Experimental investigation on the self-ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk through tubes. Proc Combust Inst 33:2351-2358.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

38. Kitabayashi N, Wada Y, Mogi T, Saburi T, Hayashi AK (2013). Experimental study on high pressure hydrogen jets coming out of tubes of 0.1e4.2 m in length. *Int J Hydrogen Energy* 38:8100-8107.
39. Golovastov S, Bocharnikov V (2012). The influence of diaphragm rupture rate on spontaneous self-ignition of pressurized hydrogen: experimental investigation. *Int J Hydrogen Energy* 37:10956-10962.
40. Kaneko W, Ishii K (2016). Effects of diaphragm rupturing conditions on self-ignition of high-pressure hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 41:10969-10975.
41. Duan Q, Xiao H, Gao W, Gong L, Sun J (2016). Experimental investigation of spontaneous ignition and flame propagation at pressurized hydrogen release through tubes with varying cross-section. *J Hazard Mater* 320:18-26.
42. Gong L, Duan Q, Sun Q, Jin K, Sun J (2017). Effects of the geometry of downstream pipes with different angles on the shock ignition of high-pressure hydrogen during its sudden expansion. *Int J Hydrogen Energy* 42:8382-8391.
43. Gong L, Duan Q, Jiang L, Jin K, Sun J (2016). Experimental study on flow characteristics and spontaneous ignition produced by pressurized hydrogen release through an Omega-shaped tube into atmosphere. *Fuel* 184:770-779.
44. Gong L, Duan Q, Liu J, Li M, Jin K, Sun J (2019). Effect of burst disk parameters on the release of high-pressure hydrogen. *Fuel* 235:485-494.
45. Duan Q, Xiao H, Gong L, Jin K, Gao W, Chai H, et al (2018). Experimental study on spontaneous ignition and subsequent flame development caused by high-pressure hydrogen release: coupled effects of tube dimensions and burst pressure. *Fire Saf J* 97:44-53.
46. Kim YR, Lee HJ, Kim S, Jeung I-S (2013). A flow visualization study on self-ignition of high pressure hydrogen gas released into a tube. *Proc Combust Inst* 34:2057-2064.
47. Yamashita K, Saburi T, Wada Y, Asahara M, Mogi T, Hayashi AK (2017). Visualization of spontaneous ignition under controlled burst pressure. *Int J Hydrogen Energy* 42:7755-7760.
48. Wen JX, Xu BP, Tam VHY (2009). Numerical study on spontaneous ignition of pressurized hydrogen release through a length of tube. *Combust Flame* 156:2173-2189.
49. Xu BP, Wen JX (2014). The effect of tube internal geometry on the propensity to spontaneous ignition in pressurized hydrogen release. *Int J Hydrogen Energy* 39:20503-20508.
50. Xu BP, Wen JX, Tam VHY (2011). The effect of an obstacle plate on the spontaneous ignition in pressurized hydrogen release: a numerical study. *Int J Hydrogen Energy* 36:2637-2644.



## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

51. Bragin MV, Molkov VV (2011). Physics of spontaneous ignition of high-pressure hydrogen release and transition to jet fire. *Int J Hydrogen Energy* 36:2589-2596.
52. Bragin M, Makarov D, Molkov V (2013). Pressure limit of hydrogen spontaneous ignition in a T-shaped channel. *Int J Hydrogen Energy* 38:8039-8052.
53. Terashima H, Koshi M, Miwada C, Mogi T, Dobashi R (2014). Effects of initial diaphragm shape on spontaneous ignition of high pressure hydrogen in a two-dimensional duct. *Int J Hydrogen Energy* 39:6013-6023.
54. Lee BJ, Jeung I-S (2009). Numerical study of spontaneous ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk into a tube. *Int J Hydrogen Energy* 34:8763-8769.
55. Lee HJ, Park JH, Kim SD, Kim S, Jeung I-S (2015). Numerical study on the spontaneous-ignition features of high-pressure hydrogen released through a tube with burst conditions. *Proc Combust Inst* 35:2173-2780.
56. Yamada E, Kitabayashi N, Hayashi AK, Tsuboi N (2011). Mechanism of high-pressure hydrogen auto-ignition when spouting into air. *Int J Hydrogen Energy* 36:2560-2566.
57. Yamada E, Watanabe S, Hayashi AK, Tsuboi N (2009). Numerical analysis on auto-ignition of a high pressure hydrogen jet spouting from a tube. *Proc Combust Inst* 32:2363-2369.
58. Rudy W, Dabkowski A, Teodorczyk A (2014). Experimental and numerical study on spontaneous ignition of hydrogen and hydrogen-methane jets in air. *Int J Hydrogen Energy* 39:20388-20395.
59. Rudy W, Teodorczyk A, Wen J (2017). Self-ignition of hydrogen-nitrogen mixtures during high-pressure release into air. *Int J Hydrogen Energy* 42:7340-7352.
60. Golovastov SV, Bocharnikov VM, SamoiloVA AA (2016). Experimental investigation of influence of methane additions on spontaneous self-ignition of pulsed jet of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 41:13322-13328.
61. Gong L, Duan Q, Liu J, Li M, Li P, Jin K, Sun J (2018). Spontaneous ignition of high-pressure hydrogen during its sudden release into hydrogen/air mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 43:23558-23567.
62. Bragin, MV and Molkov, VV (2011). Physics of spontaneous ignition of high-pressure hydrogen release and transition to jet fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36(3), pp. 2589-2596.
63. Bragin, MV, Makarov, DV and Molkov, VV (2011). Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Hydrogen Safety, 12-14 September 2011, San Francisco, USA.

## Lecture 8: Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation

64. Bragin, M and Molkov, V (2009). Physics of spontaneous ignition of high-pressure hydrogen release and transition to jet fire, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydrogen Safety*, 16-18 September 2009, Ajaccio, France.
65. Health and Safety Executive (2012). Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources. Available from: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [accessed 23.11.20].
66. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
67. CENELEC (2003). Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity, PD CLC/TR 50404:2003.
68. NFPA (2000). Recommended Practice on Static Electricity. 77.
69. British Standards Institution. Electrostatics (2003). Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity. PD CLC/TR 50404: 2003.
70. European Parliament and European Council, Directive 1999/92/EC of the European Parliament and Council of 16 December 1999 on the minimum requirements for improving safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres (15<sup>th</sup> individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). 1999/92/EC (2000).
71. IEC, Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 0: General requirements. EN60079-0 (2006).