



Programme européen de formation des formateurs pour le personnel de secours

## Cours 6

# Critères de danger pour les personnes et les biens

## NIVEAU IV

### Officier spécialiste

Les informations figurant dans ce cours sont destinées aux **officiers spécialistes**.

Ce sujet est également disponible pour les intervenants de niveau I à III.

Ce cours fait partie d'un ensemble de supports de formation adressés aux intervenants de niveau I à IV : sapeur-pompier, chef d'agrès, commandant d'opération et officier spécialiste. Veuillez consulter l'introduction du cours relative aux attentes en matière de compétences et d'apprentissage.

Remarque : ces documents sont la propriété du Consortium HyResponder et doivent être reconnus comme tels ; les résultats d'HyResponse ont servi de base.



### Clause de non-responsabilité

Malgré le soin apporté à la préparation du présent document, la clause de non-responsabilité suivante s'applique : les informations figurant dans le présent document sont fournies telles quelles et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. L'utilisateur y a recours à ses propres risques et sous son entière responsabilité.

Ce document ne reflète que le point de vue de ses auteurs. L'entreprise commune PCH et l'Union européenne ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

### Remerciements

Ce projet a reçu un financement de la Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (aujourd'hui dénommée Clean Hydrogen Partnership) au titre de la Convention de subvention n° 875089. Cette entreprise commune est soutenue par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, ainsi que par les organisations Hydrogen Europe et Hydrogen Europe Research.

## Résumé

Ce cours fournit aux intervenants des informations utiles sur l'impact des fuites, des incendies et des explosions d'hydrogène sur la santé et l'environnement des êtres humains. Il passe également en revue les dommages que les incendies d'hydrogène et les événements de surpression causent aux structures et aux équipements. Il est principalement axé sur les effets thermiques et de surpression sur les personnes ainsi que sur les environnements naturels et bâtis. Il est très important de connaître les critères de danger et de dommage pour évaluer un lieu d'accident et pour prendre des décisions éclairées à l'égard des pratiques d'intervention. Bien que ce cours n'ait pas pour but de fournir des valeurs seuils absolues aux intervenants, ceux-ci doivent avoir connaissance des critères d'acceptation applicables au grand public, aux opérateurs, aux utilisateurs d'une installation de piles à combustible et à hydrogène (PCH) et à eux-mêmes. Ce cours présente également le système d'étiquetage aux intervenants. Certaines exigences en matière d'équipement de protection individuelle sont également abordées.

## Mots-clés

Accident lié à l'hydrogène, rayonnement thermique, surpression, critères de nocivité, équipement de protection individuelle

## Table des matières

|  |          |
|--|----------|
| Résumé.....  | 3        |
| Mots-clés .....  | 3        |
| <b>Table des matières.....</b>   | <b>4</b> |
| 1. Public cible.....   | 5        |
| 1.1 Description du rôle : spécialiste .....  | 5        |
| 1.2 Niveau de compétence : spécialiste.....  | 5        |
| 1.3 Apprentissage préalable : spécialiste.....   | 5        |
| 2. Introduction et objectifs .....   | 5        |
| 2. Principales définitions.....  | 7        |
| 3. Risques pour la santé des libérations d'hydrogène.....  | 8        |
| 3.1 Hydrogène gazeux.....  | 8        |
| 3.2 Hydrogène liquéfié.....  | 12       |
| 4. Effets nocifs de la combustion de l'hydrogène sur les êtres humains .....                               | 14       |
| 4.1 Effet de la température de l'air .....   | 14       |
| 4.2 Effet du contact direct avec les flammes d'hydrogène .....   | 16       |
| 4.3 Effet du flux thermique radiatif issu des incendies d'hydrogène .....                                  | 17       |
| 4.4 Effets des surpressions sur les êtres humains.....   | 20       |
| 5. Dommages causés aux structures, aux équipements et à l'environnement par les incendies d'hydrogène..... | 24       |
| 6. Impact de la surpression sur les structures et les équipements.....                                     | 25       |
| 7. Résumé des critères d'acceptation relatifs à la sécurité des personnes et aux pertes matérielles .....  | 28       |
| 8. Étiquetage des systèmes d'hydrogène.....  | 29       |
| 9. Équipement de protection individuelle .....   | 32       |
| 10. Impact sur l'environnement.....  | 34       |
| Remerciements.....   | 35       |
| Références .....   | 35       |

## 1. Public cible

Les informations figurant dans ce cours sont destinées aux officiers spécialistes. Ce cours est également disponible pour les intervenants de niveau I : sapeur-pompier.

La description du rôle, le niveau de compétence et les attentes en matière d'apprentissage relatifs aux officiers spécialistes sont décrits ci-après.

### 1.1 Description du rôle : spécialiste

Les officiers spécialistes assistent les commandants d'opération. Ils les conseillent, dirigent et supervisent les opérations techniques qui requièrent de mobiliser des connaissances, des compétences ou des équipements liés à un risque spécifique ou à une activité d'intervention. Les incidents classiques impliquent des matières dangereuses, des véhicules de transport, des phénomènes climatiques, des défaillances structurelles et d'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 ainsi que des compétences renforcées par l'expérience, permettant d'appliquer ces informations et connaissances en connaissance de cause, pour que le commandant d'opération et le personnel de secours sous la direction de l'officier spécialiste puissent réagir efficacement et en toute sécurité aux situations d'urgence.

### 1.3 Apprentissage préalable : spécialiste

CEC 5 Savoirs détaillés, spécialisés, factuels et théoriques dans un domaine de travail ou d'études, et conscience des limites de ces savoirs. Gamme étendue d'aptitudes cognitives et pratiques requises pour imaginer des solutions créatives à des problèmes abstraits. Gérer et superviser des activités dans un contexte de travail ou d'études où les changements sont imprévisibles ; examiner et améliorer ses résultats et ceux des autres.

## 2. Introduction et objectifs

La sécurité de l'hydrogène a pour principale finalité la protection des personnes et des biens. Il est donc important d'établir des critères applicables aux opérateurs, aux utilisateurs, au grand public ainsi qu'aux intervenants susceptibles de subir les conséquences d'un incident ou d'un accident sur un système ou une infrastructure de PCH. Les critères d'acceptation applicables aux clients et au personnel impliqués dans le fonctionnement, l'inspection et l'entretien des installations et infrastructures de PCH sont similaires. En revanche, pour les personnes « ordinaires » qui se trouveraient à proximité d'un incident/accident, il convient d'adopter une approche plus prudente. Conformément à la norme britannique BS 7974 (2004), les sapeurs-pompiers sont considérés comme une catégorie à part de personnes impliquées. Ils ne sont pas présents sur l'installation de PCH lorsque l'incident/accident se produit et arrivent souvent sur les lieux lorsque les conditions sont les plus dangereuses et qu'ils doivent accomplir leur mission. Ils sont exposés au risque d'effondrement éventuel des bâtiments/structures et aux conséquences de l'onde de choc. De plus, comme ils sont munis d'équipements de protection

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

individuelle (EPI) spécifiques, ils peuvent supporter des niveaux plus élevés de rayonnement thermique et de température, ainsi que des atmosphères asphyxiantes et toxiques. En outre, l'emplacement d'une personne dans l'infrastructure de PCH au moment d'un incident/accident est très important. En effet, les conséquences d'un incident/accident lié à l'hydrogène peuvent être immédiates et avoir un impact différent sur les personnes en fonction de leur proximité par rapport à la source de danger. Les personnes qui se trouvent à l'intérieur du bâtiment sont plus susceptibles d'être touchées par l'onde de choc que celles qui se trouvent à l'extérieur.

Le projet HyResponder ne vise pas à définir des critères de danger ou des valeurs seuils harmonisés pour caractériser les impacts potentiels des phénomènes dangereux. Les parties prenantes concernées doivent appliquer les normes en vigueur dans leur propre pays.

À l'issue de ce cours, les intervenants seront en mesure :

- De décrire les principaux risques pour la santé associés aux libérations non enflammées, aux explosions physiques (rupture d'un réservoir sous pression), aux incendies, aux déflagrations et aux détonations d'hydrogène gazeux et liquéfié ;
- De définir les effets nocifs liés aux libérations d'hydrogène non enflammées dans des espaces confinés :
  - le niveau sonore ;
  - l'effet de la température de l'hydrogène ;
  - l'effet de la surpression en cas de phénomène de pic de pression.
- De définir les effets nocifs de la combustion de l'hydrogène sur les êtres humains :
  - l'effet de la température de l'atmosphère de combustion ;
  - l'exposition au flux thermique radiatif ;
  - l'effet de la surpression.
- De comprendre les principes et la mise en œuvre des critères de danger pour les personnes et l'environnement ainsi que des critères de dommage pour les structures et les équipements :
  - la température de l'air ;
  - la dose thermique ;
  - le flux thermique ;
  - la surpression, etc.
- De spécifier les niveaux de dose thermique dangereux et la dose létale à 50 % (LD50) ;
- De distinguer les effets nocifs directs et indirects de la surpression sur les êtres humains ;
- De mettre en corrélation les dommages causés aux structures, à l'équipement et à l'environnement par les incendies d'hydrogène et les ondes de choc avec les niveaux de flux thermique radiatif et de surpression ;
- De reconnaître les systèmes d'étiquetage destinés au stockage de l'hydrogène gazeux et liquéfié dans les applications à pile à combustible et à hydrogène ;

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

- De répertorier les équipements de protection individuelle qui doivent être utilisés non seulement par les premiers secours, mais également par le personnel des installations de PCH ;
- De décrire l'impact de l'hydrogène sur l'environnement.

## 2. Principales définitions

Il est important que les intervenants soient en mesure d'évaluer l'impact des incidents ou des accidents liés à l'hydrogène sur la sécurité des personnes et le contrôle des sinistres. Il existe plusieurs méthodes pour définir et évaluer les conséquences d'un incident ou d'un accident en fonction de sa gravité, de l'exposition, de la durée et de la cible étudiée (grand public, occupants, structures, bâtiments, équipement, etc.). Voici quelques définitions utiles de termes employés dans les cours actuels et à venir.

Les *critères d'acceptation* sont les conditions de référence permettant d'évaluer le degré de sécurité d'une installation/infrastructure de PCH [1].

L'*incapacité* est une situation dans laquelle les fonctions d'une personne sont altérées, ce qui la rend inapte à échapper à des conditions insoutenables [2].

Les *occupants* sont les personnes présentes dans les limites d'une installation/infrastructure de PCH, y compris le personnel responsable de son fonctionnement et de son entretien, ainsi que les clients/visiteurs [1].

Un *lieu sûr* est un endroit prédéterminé, à l'intérieur ou à l'extérieur d'une installation/infrastructure de PCH, dans lequel les personnes ne sont pas en danger immédiat à la suite de la libération, de l'incendie ou de l'explosion d'hydrogène [1].

Le *grand public* désigne les personnes présentes hors des limites d'une installation/infrastructure de PCH.

Une *zone sensible* désigne l'établissement, l'infrastructure ou l'équipement contenant des stocks de substances dangereuses susceptibles de devenir une source de danger s'ils sont la cible d'un incident ou d'un accident lié à l'hydrogène [1].

La *capacité de survie* est l'exposition maximale pendant laquelle la probabilité statistique de décès/blessures est négligeable et ne compromettant pas la capacité d'une personne à s'échapper [1].

La *tenabilité* est l'exposition maximale aux dangers consécutifs à un incident ou un accident lié à l'hydrogène pouvant être tolérée sans porter atteinte aux objectifs de sécurité [1].

Le *seuil* est l'intensité maximale d'un danger donné, qui correspond à une réponse physiologique (pour les êtres humains) ou structurelle (pour les structures et les équipements) spécifique [1].

### 3. Risques pour la santé des libérations d'hydrogène

L'hydrogène gazeux étant plus léger que l'air, il monte et se dilue rapidement dans l'air en cas de libération accidentelle dans un environnement ouvert. Une libération accidentelle dans un espace confiné/à l'intérieur peut être dangereuse pour les êtres humains car elle peut provoquer une asphyxie. En outre, les libérations d'hydrogène dans les espaces confinés présentent des risques d'explosion. Les mélanges hydrogène-air sont inflammables du fait de la large plage d'inflammabilité de l'hydrogène ; de 4 à 75 % en volume. En cas de libération dans l'air et en présence d'une source d'inflammation, l'hydrogène entre en combustion, produisant de l'eau et de la chaleur. La probabilité d'inflammation de l'hydrogène à la suite de sa libération est très élevée, car son énergie minimale d'inflammation est faible ; une simple décharge d'électricité statique peut suffire à enflammer l'hydrogène. Pour les intervenants, il n'est pas nécessaire d'utiliser des vêtements dissipateurs d'électricité statique, car les décharges d'électricité statique ne suffisent à enflammer l'hydrogène que dans de rares cas. Pour obtenir plus de détails, reportez-vous au Cours 8 - Sources d'inflammation et prévention de l'inflammation. En cas d'incendie, la flamme d'hydrogène est presque invisible à la lumière du jour et sa température peut atteindre 2 000 °C. Bien qu'une flamme d'hydrogène ait un faible rayonnement par rapport à une flamme d'hydrocarbures, les intervenants courent un risque en allant dans les flammes. La propagation de la flamme dans le mélange hydrogène-air est beaucoup plus rapide que dans le cas du gaz naturel comprimé (GNC) et du gaz de pétrole liquéfié (GPL), et le risque de transformation en détonation ne peut donc pas être exclu. Concernant l'état liquide de l'hydrogène, les principaux risques sont liés aux températures extrêmement basses ainsi qu'à l'éventuelle vaporisation (1 litre d'hydrogène liquide se transforme en 870 litres de gaz dans des conditions normales de température et de pression), ce qui peut également conduire à l'asphyxie si le LH<sub>2</sub> est libéré à l'intérieur d'un bâtiment.

#### 3.1 Hydrogène gazeux

L'hydrogène est un gaz inodore, incolore et insipide, indétectable par l'être humain. Il n'est pas possible d'utiliser des substances odorantes (par exemple des mercaptans) dans les réservoirs de stockage car cela risquerait d'empoisonner les piles à combustible. L'hydrogène n'est pas une substance cancérigène. L'hydrogène n'a normalement pas d'effets mutagènes<sup>1</sup>, tératogènes<sup>2</sup>, embryotoxiques<sup>3</sup> ni toxiques pour la reproduction. Aucune preuve d'effets indésirables sur la peau ou les yeux n'a été apportée après exposition à des atmosphères d'hydrogène. Toutefois, les jets d'hydrogène à haute pression peuvent couper la peau nue [3].

---

<sup>1</sup> L'induction d'évolutions transmissibles permanentes de la quantité ou de la structure du matériel génétique des cellules ou des organismes.

<sup>2</sup> Anomalies congénitales dues à un effet toxique sur l'embryon ou le fœtus.

<sup>3</sup> Effets toxiques sur l'embryon d'une substance qui traverse la barrière placentaire.



## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

L'hydrogène ne peut pas être ingéré. Cependant, en cas d'inhalation, l'hydrogène peut entraîner la formation d'un mélange inflammable dans les poumons humains.

À l'instar d'autres gaz, une augmentation de la concentration en hydrogène entraîne une réduction des niveaux d'oxygène dans l'air, ce qui peut conduire à l'*asphyxie*. L'hydrogène est classé dans la catégorie des *asphyxiants* simples ; il ne présente pas de valeur limite d'exposition [4]. Dans des espaces totalement/partiellement confinés, de fortes concentrations d'hydrogène dans l'air entraînent la formation d'*atmosphères pauvres en oxygène*. Les personnes exposées à de telles atmosphères peuvent présenter les symptômes suivants : maux de tête, vertiges, somnolence, perte de connaissance, nausées, vomissements, perte de tous les sens, etc. Les victimes peuvent avoir la peau bleutée et, dans certaines circonstances, elles peuvent en mourir. En cas d'inhalation d'hydrogène et si les symptômes susmentionnés se manifestent, la personne doit être conduite à l'extérieur ; de l'oxygène doit lui être administré en cas de difficultés respiratoires, ou elle doit être mise sous respiration artificielle si elle ne respire plus.

Le Tableau 1 indique les effets physiologiques causés par l'appauvrissement en oxygène. L'hydrogène peut provoquer une asphyxie en diluant l'oxygène de l'air à des concentrations inférieures au niveau de sécurité, c'est-à-dire inférieures à 19 % en volume. Les concentrations d'oxygène inférieures à 19,5 % en volume sont biologiquement inactives pour les êtres humains ; aucun effet de la privation d'oxygène n'est généralement observé. À des concentrations d'oxygène inférieures à 12 % en volume, une perte de connaissance est susceptible de se produire immédiatement, sans aucun symptôme préalable.

Tableau 1. Réaction humaine à l'appauvrissement en oxygène [4]

| Concentration en H <sub>2</sub> % en volume | Concentration d'O <sub>2</sub> , % en volume | Effet physiologique  |
|---|--|--|
| <b>0-9</b>                                  | 21-19  | Pas de symptômes spécifiques   |
| <b>9-28</b>                                 | 15-19  | Diminution de la capacité à effectuer des tâches ; peut induire des symptômes précoces chez les personnes souffrant de problèmes cardiaques, pulmonaires ou de circulation sanguine                                    |
| <b>28-42</b>                                | 12-15  | Respiration plus profonde, pouls plus rapide, mauvaise coordination  |
| <b>42-52</b>                                | 10-12  | Vertiges, manque de discernement, lèvres légèrement bleutées   |
| <b>52-62</b>                                | 8-10   | Nausées, vomissements, perte de connaissance, visage blême, évanouissement, troubles mentaux, avec un temps de tolérance de 5 minutes  |
| <b>62-71</b>                                | 6-8  | Perte de connaissance en 3 minutes, décès en 8 minutes. 50 % de décès et 50 % de guérison si un traitement est administré dans les 6 minutes, 100 % de guérison si un traitement est administré dans les 4 à 5 minutes |
| <b>71-86</b>                                | 3-6  | Coma en 40 secondes, convulsions, arrêt respiratoire et décès  |
| <b>86-100</b>                               | 0-3  | Décès en 45 secondes   |

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

Le système doit être conçu pour prévenir tout risque d'asphyxie pour le personnel qui travaille dans des espaces confinés [4]. Le système doit être conçu pour assurer la protection du personnel qui entre dans l'espace clos, à moins que les procédures d'entrée en espace confiné ne soient strictement appliquées. Les premiers secours sont invités à vérifier la concentration en oxygène avant de pénétrer dans une zone d'incident ou d'accident (aucune odeur anormale n'est perceptible en cas de concentrations dangereuses), ainsi qu'à porter un appareil respiratoire autonome. Les concentrations en hydrogène doivent être mesurées à l'aide d'un détecteur approprié [5]. Il est important de souligner qu'il faut utiliser des détecteurs de gaz spécifiques à l'hydrogène.

Pour l'occupant d'une installation de PCH, la valeur maximale de la concentration en hydrogène dans l'air est d'environ 40 % en volume car cela correspond à un niveau d'atteinte physiologique qui peut être extrêmement préjudiciable à la santé humaine et à la capacité d'évacuer les lieux. La valeur acceptable pour le grand public est d'environ 9 % en volume. Au-delà de ce niveau, des problèmes de santé peuvent survenir. Pour les intervenants munis d'équipements de protection individuelle (EPI) tels que des appareils respiratoires, la valeur acceptable de concentration en hydrogène dans l'air est plus élevée et peut atteindre 100 % en volume. Cependant, la présence d'intervenants dans une atmosphère hydrogène-air inflammable n'est pas recommandée pendant l'intervention.

Le *risque acoustique* associé aux libérations d'hydrogène sous haute pression est un autre type de risque dont les intervenants doivent tenir compte. Les effets sur la santé des différents niveaux sonores sont représentés sur la Figure 1. On constate qu'à des niveaux sonores supérieurs à 85 à 90 dB, des dommages auditifs peuvent survenir et qu'il est recommandé de porter une protection auditive. Le seuil de douleur s'élève à 130 dB et, à des niveaux sonores supérieurs à 140 dB, une perte soudaine de l'audition est très probable. Il convient de noter qu'un bruit intense peut entraîner un *traumatisme sonore*, c'est-à-dire une altération soudaine de l'audition due à une exposition unique à une explosion ou à un bruit soudain [7].

| level | Noise source                                   | Health effects           |
|-------|--|--------------------------|
| 140dB | Jet plane take off, firecracker, gun shot      | Sudden damage to hearing |
| 130dB | Pain threshold exceeded                        |                          |
| 120dB | Ambulance siren, pneumatic drill, rock concert |                          |
| 110dB | Night clubs, disco                             |                          |
| 100dB | Motor cycle at 50km/h                          |                          |
| 90dB  | Heavy goods vehicle at 50km/h                  |                          |
| 85dB  | Hearing protection recommended in industry     | Hearing loss, tinnitus   |
| 75dB  |  | Cardiovascular effects   |
| 70dB  |  | Sleep disturbances       |
| 65dB  |  | Stress effects           |
| 60dB  |  | Annoyance                |
| 55dB  | Desirable outdoor level                        |                          |
| 50dB  | Normal conversation level                      |                          |
| 40dB  | Quiet suburb                                   |                          |
| 30dB  | Soft whisper                                   |                          |
| 20dB  | Normal conversation level                      |                          |

Source: Nopher, a European Commission concerted action to reduce the health effects of noise pollution.  
<http://www.ucl.ac.uk/noiseandhealth/EC%20Brochure1.pdf>

Figure 1. Effets des niveaux sonores sur la santé [6]

Comme le montre la Figure 2, même les petites fuites d'hydrogène génèrent un bruit ultrasonique suffisant pour pouvoir être détectées dans la plupart des environnements industriels [7]. Tandis que le *bruit acoustique audible* se situe généralement entre 60 et 110 dB sur les sites industriels, les *niveaux de bruit ultrasonique* (plage de fréquences de 25 à 100 kHz) se situent entre 68 et 78 dB dans les zones très bruyantes, où sont installées des machines rotatives telles que les compresseurs et les turbines, et dépassent rarement 60 dB dans les zones peu bruyantes. Par conséquent, les détecteurs de fuites de gaz à ultrasons peuvent détecter les fuites d'hydrogène sans être affectés par le bruit de fond. Étant donné que les instruments réagissent à la libération de gaz plutôt qu'au gaz lui-même, ils peuvent donner l'alerte rapidement, souvent en l'espace de quelques millisecondes. Comme le montre la Figure 2, le niveau de pression acoustique ultrasonique est presque inversement proportionnel à la distance par rapport à la source de bruit (c'est-à-dire la fuite d'hydrogène).

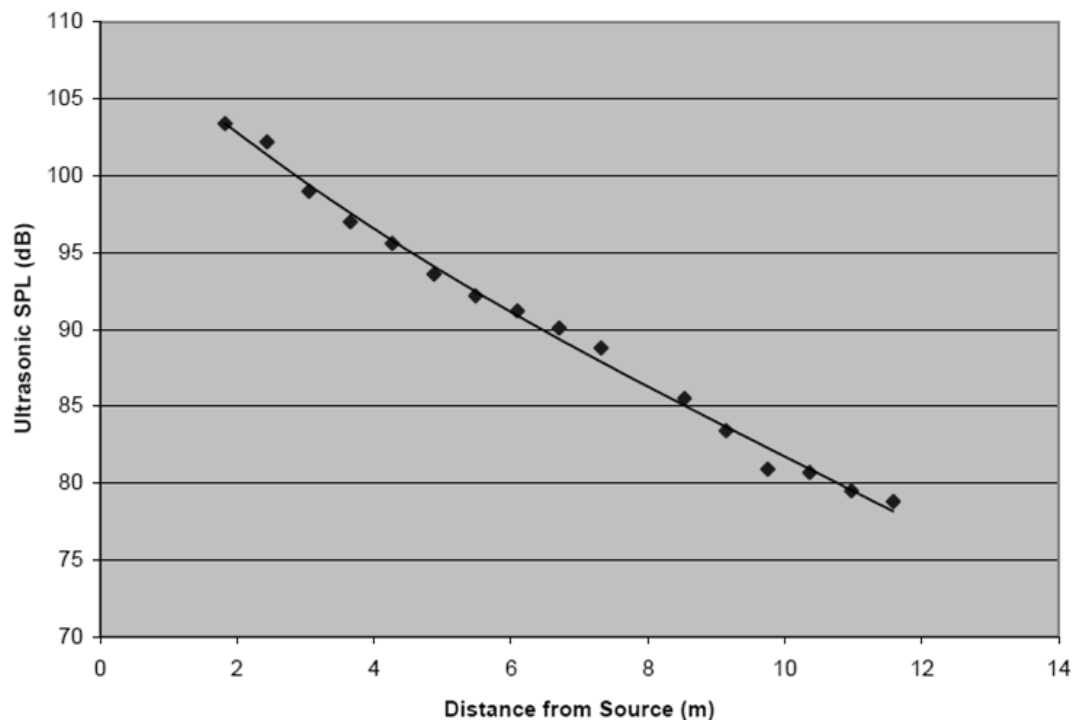


Figure 2. Niveau de pression acoustique *en fonction* de la distance par rapport à la source de la fuite d'hydrogène (diamètre de fuite : 1 mm ; pression : 5 515 kPa ; taux de fuite : 0,003 kg/s) [7]

Un équipement mis sous pression à 200 bar et équipé d'une sortie de type lyre présentant un diamètre d'orifice de 4 mm émet un bruit de 130 dB. Lors des essais effectués par Air Liquide sur un tuyau de 5 mm de diamètre et mis sous pression à 700 bar, le niveau sonore était compris entre 100 et 140 dB. Les fuites d'hydrogène produisant une pression sonore de 50 à 60 dB ne présentent aucun risque pour les personnes présentes à proximité, à moins qu'elles ne se trouvent dans un espace confiné [8].

### 3.2 Hydrogène liquéfié

En raison de son faible point d'ébullition (-253 °C), l'hydrogène liquéfié peut être stocké/utilisé à des températures extrêmement basses. Les risques pour la santé associés à la libération d'hydrogène liquéfié sont décrits ci-après.

- Le contact avec l'hydrogène liquide ou ses éclaboussures sur la peau ou dans les yeux peut provoquer de graves brûlures dues au froid par *engelures ou hypothermie*.
- Des *brûlures cryogéniques* peuvent également survenir si des parties du corps non protégées entrent en contact avec des fluides froids ou des surfaces froides.
- L'inhalation de vapeurs d'hydrogène froides peut provoquer une *gêne respiratoire* et peut aboutir à une *asphyxie*.
- Le contact physique direct avec du LH<sub>2</sub>, des vapeurs froides ou un équipement froid peut provoquer de graves *lésions tissulaires*. Un contact temporaire avec une petite quantité du liquide présente un risque de brûlure réduit, car un film protecteur

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

d'hydrogène gazeux en cours d'évaporation peut se former. Le risque de congélation survient lorsque d'importantes quantités sont déversées et que l'exposition est prolongée<sup>4</sup>.

- Le personnel ne doit pas toucher les parties métalliques froides et doit porter des *vêtements de protection*. Il doit également protéger la zone concernée avec une housse amovible.
- Les températures corporelles internes inférieures ou égales à 27 °C sont propices aux *problèmes cardiaques*, tandis que les températures corporelles internes inférieures à 15 °C peuvent entraîner la mort [5].
- *L'asphyxie* est une autre conséquence possible si de l'hydrogène liquéfié est libéré et vaporisé en intérieur.

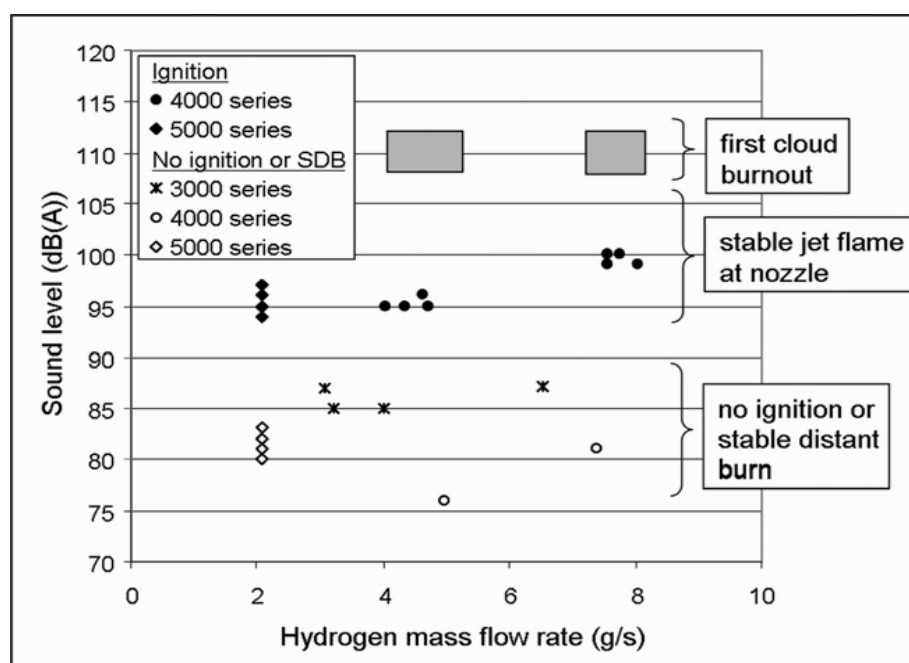


Figure 3. Niveaux sonores mesurés au niveau de jets d'hydrogène cryogénique stationnaires enflammés et non enflammés [9]

Friedrich et al. [9] ont mesuré les niveaux sonores au niveau de jets cryogéniques enflammés et non enflammés (diamètre de la buse de 1 mm, pression allant jusqu'à 30 bar, débit massique d'hydrogène allant jusqu'à 8 g/s, température comprise entre 34 et 65 K). Il convient de noter que le niveau sonore dépend de la pression de jaillissement et du débit massique. Aux fins de l'évaluation du niveau sonore, quatre compteurs différents ont été installés à une distance de 1,23 m, 1,65 m, 2,91 m et 4,55 m de la buse de libération, à l'intérieur d'une cellule d'essai [9]. Les niveaux des signaux du sonomètre à l'état d'équilibre sont illustrés sur la Figure 3. « Les jets enflammés ont généré des niveaux sonores supérieurs d'environ 10 dB (A) par rapport aux

<sup>4</sup> Effet de l'azote liquide : <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

jets non enflammés. Lorsque le débit massique de l'hydrogène augmente, il semble y avoir une faible augmentation du niveau sonore. L'épuisement initial du stock d'hydrogène dans le jet n'ayant pas réagi est à l'origine des émissions sonores les plus élevées » [9].

Les niveaux sonores mesurés dans le cadre de cette étude ( $\leq 112$  dB(A)) ne sont considérés comme dangereux qu'en cas d'exposition permanente ou de longue durée. Des dommages auditifs dus à des ondes sonores courtes ne peuvent être observés qu'à partir de 120 dB(A). « Les niveaux sonores des jets d'hydrogène cryogénique non enflammés et enflammés mesurés dans le cadre de cette étude ne présentent donc aucun risque pour la santé, même aux faibles distances étudiées (1,2 à 4,5 m). Par ailleurs, les niveaux sonores mesurés sont suffisamment élevés pour pouvoir identifier et localiser rapidement un jet d'hydrogène libre ou une flamme-jet à l'aide de sonomètres » [9].

## 4. Effets nocifs de la combustion de l'hydrogène sur les êtres humains

L'inhalation des produits de la combustion de combustibles classiques est l'une des premières causes de préjudice corporel et l'une des principales conséquences des incendies. Elle est considérée comme moins grave dans le cas de l'hydrogène car sa combustion produit uniquement de la vapeur d'eau (non toxique, non nocive). En revanche, le monoxyde de carbone CO peut s'avérer mortel à des concentrations légèrement supérieures à 400 ppm (parties par million) [10]. Toutefois, les incendies secondaires peuvent produire de la fumée ou d'autres produits de combustion présentant un risque pour la santé.

### 4.1 Effet de la température de l'air

La température de la flamme d'un mélange hydrogène-air stœchiométrique est d'environ 2 403 K [11]. Lors d'un incendie d'hydrogène, la température de l'air ambiant augmente considérablement, ce qui peut avoir un impact sur les personnes qui se trouvent à proximité. Le contact direct avec l'hydrogène en combustion ou les gaz chauds issus de la flamme découlant de la combustion de l'hydrogène provoque de graves *brûlures thermiques*. L'augmentation de la température de l'air peut entraîner des difficultés respiratoires ou des brûlures des voies respiratoires. Une température élevée peut également entraîner un collapsus.

Tableau 2. Effet de la température de l'air sur les personnes [12]

| Température de l'air, °C | Réaction physiologique  |
|--------------------------|---|
| 70                       | Pas d'issue fatale dans les espaces clos, hormis une sensation d'inconfort            |
| 115                      | Seuil de douleur (durée d'exposition de plus de 5 minutes)                            |
| 127                      | Difficultés respiratoires   |
| 149                      | Respiration par la bouche difficile, limite de température pour s'échapper            |
| 160                      | Douleur vive et insupportable et sécheresse cutanée                                   |
| 182                      | Lésions irréversibles en 30 secondes  |
| 203                      | Durée de tolérance du système respiratoire inférieure à quatre minutes, peau mouillée |

Selon le rapport de la DNV (un organisme de recherche norvégien) de 2001 [12], les effets de l'augmentation de la température de l'air (dans une atmosphère apparemment calme) sont classés comme suit :

- lorsque la température est inférieure à 70 °C, aucun décès n'est à déplorer dans les espaces confinés, hormis une sensation d'inconfort.
- lorsque la température est comprise entre 70 °C et 150 °C, les difficultés respiratoires constituent le principal impact sur les êtres humains.
- si la température dépasse 150 °C, des brûlures cutanées surviennent en moins de 5 minutes.

Le Tableau 2 donne plus de détails sur la réaction physiologique à l'air chauffé.

La valeur de 149 °C correspond à la température limite pour s'échapper. Par ailleurs, la valeur de 115 °C correspond au seuil de douleur pour une durée d'exposition de plus de 5 minutes selon les normes britanniques (BSI PD7974-6:2004) [13]. En outre, deux équations provenant respectivement des références [12] et [14] peuvent s'avérer très utiles pour évaluer le temps d'incapacité ( $t_{inc}$ , en minutes) en fonction de la température de l'air :

$$t_{inc} = 5.33 \times 10^8 \times T_{air}^{-3.66} \quad (1)$$

$$t_{inc} = 5 \times 10^7 \times T_{air}^{-3.4} \quad (2)$$

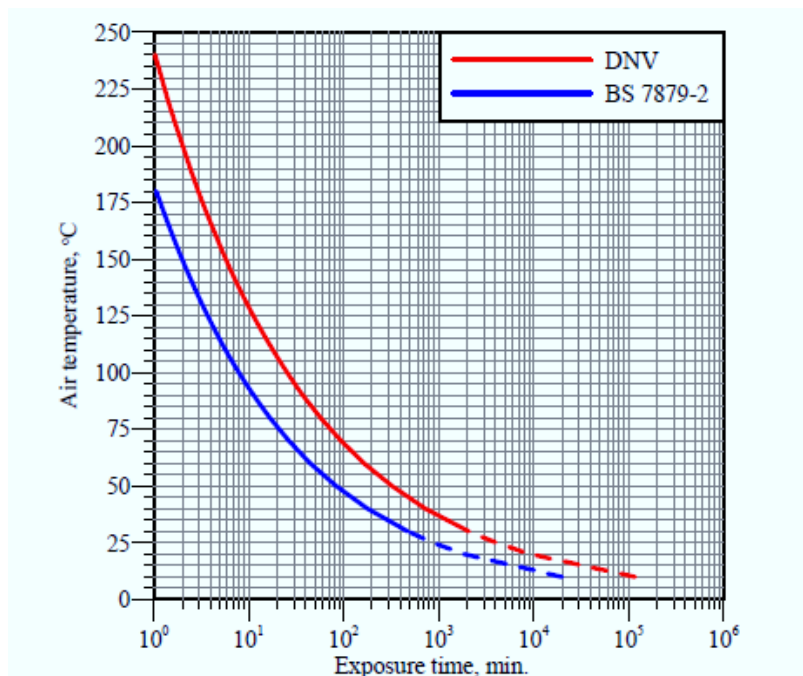


Figure 4. Temps d'incapacité ( $t_{inc}$ ) en fonction du temps d'exposition selon la référence [12] (ligne rouge) et la référence [14] (ligne bleue)



## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

La Figure 4 montre deux graphiques tracés sur la base des équations (1) et (2) ci-dessus et appliqués à la plage de température comprise entre 0 et 210 °C. Veuillez noter qu'à des températures inférieures, les parties des graphiques en pointillés ne doivent pas être prises en compte. L'équation fondée sur la norme BS 7879-2 (graphique bleu) donne des valeurs plus prudentes que l'équation fondée sur l'approche DNV (graphique rouge). Comparons les valeurs indiquées dans le Tableau 2 avec celles de la Figure 4. La température de 149 °C est une température limite qui empêche les occupants de l'installation de s'échapper. Selon la Figure 4, le temps d'incapacité correspondant à cette température est compris entre 2 minutes (graphique bleu) et 5 minutes (graphique rouge). Si l'on considère la température correspondant au seuil de douleur (115 °C), le temps d'incapacité est compris entre 5 minutes (approche BS 7879-2) et 15 minutes (approche DNV).

Les critères d'acceptation d'une température de l'air chaude sont les suivants : 70 °C - valeur tolérable pour le grand public ; 115 °C - valeur tolérable pour permettre aux occupants de s'échapper pour une durée d'exposition de 5 minutes ; 149 °C - température maximale de l'air qui empêche les occupants de s'échapper. Les intervenants sont réputés porter d'un EPI adapté, tel qu'un appareil respiratoire capable de protéger leur système respiratoire des effets des températures élevées. Il s'avère que les vêtements d'approche feu peuvent fournir une protection contre l'air chauffé jusqu'à 1 093 °C sur une courte durée [15].

### 4.2 Effet du contact direct avec les flammes d'hydrogène

L'impact des flammes d'hydrogène sur les êtres humains est similaire à celui des flammes d'autres combustibles courants. Le contact direct avec l'hydrogène en combustion ou les gaz chauds issus de la flamme découlant de la combustion de l'hydrogène provoque de graves brûlures [11]. Une étude menée sur les incendies d'hydrocarbures par le HSE (Health and Safety Executive) [16] a permis d'identifier différents types d'incendies et leurs effets sur la population en fonction de leur intensité, de leur durée et de leur ampleur (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques des principaux types d'incendies d'hydrogène [16]

| Type d'incendie     | Durée de l'incendie | Ampleur de l'incendie | Intensité de l'incendie | Impact sur l'homme   |
|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|--|
| Boule de feu        | Très brève          | Grande                | Très élevée             | Rayonnement, peu de chances de s'échapper  |
| Incendie instantané | Très brève          | Grande                | Moyenne                 | Immersion : décès en général dans le périmètre de l'incendie, peu de chances de s'échapper |
| Feu en nappe        | Brève               | Moyenne               | Faible ou moyenne       | Rayonnement, immersion, bonnes chances de s'échapper                                       |
| Jet enflammé        | Moyenne ou longue   | Moyenne               | Élevée                  | Rayonnement, contact direct avec les flammes, bonnes chances de s'échapper                 |

Les données présentées dans le Tableau 4 montrent l'impact de l'âge d'une personne et de la surface de peau brûlée sur la probabilité de décès.



## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

Tableau 4. Surface de peau brûlée entraînant une probabilité de décès de 50 % [16]

| Tranche d'âge, années | Surface brûlée, % |
|-----------------------|-------------------|
| 0-4                   | 60,0              |
| 5-34                  | 71,2              |
| 35-49                 | 61,8              |
| 50-59                 | 52,1              |
| 60-74                 | 33,7              |
| Plus de 75            | 19,6              |

En outre, le Tableau 5 estime la probabilité de décès dans la tranche d'âge 40-44 ans, en fonction du pourcentage de la surface corporelle brûlée. Il apparaît clairement que de nombreuses personnes décèdent en raison d'une brûlure importante couvrant une grande partie de leur surface corporelle.

Tableau 5. Probabilité de décès en fonction de la surface corporelle brûlée pour les personnes âgées de 40 à 44 ans [17]

| Surface corporelle brûlée, % | Probabilité de décès, % |
|------------------------------|-------------------------|
| 78-100                       | 100                     |
| 68-77                        | 90                      |
| 63-67                        | 80                      |
| 53-62                        | 70                      |
| 48-52                        | 60                      |
| 43-47                        | 40                      |
| 33-42                        | 30                      |
| 28-32                        | 20                      |
| 18-27                        | 10                      |
| 0-17                         | 0                       |

### 4.3 Effet du flux thermique radiatif issu des incendies d'hydrogène

Une flamme d'hydrogène dégage beaucoup moins de chaleur qu'une flamme d'hydrocarbures et est pratiquement invisible en plein jour. La longueur d'onde maximale de son émission est d'environ 311 nm, soit une valeur proche de la partie ultraviolette (UV) du spectre électromagnétique [11]. Autrement dit, il se peut que les personnes situées à proximité d'une flamme d'hydrogène n'en perçoivent pas la proximité avant d'être en contact avec elle [11]. En l'absence d'équipement de détection approprié, les premiers éléments indiquant la présence d'une petite flamme seront probablement le « sifflement » produit par le gaz qui s'échappe par un orifice, et peut-être l'apparition d'« ondes de chaleur » [11].

Veillez noter qu'une flamme d'hydrogène émet un faible rayonnement infrarouge et pratiquement aucun rayonnement visible. En raison de l'absence de bandes de rayonnement de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et de la forte absorption par la vapeur d'eau ambiante, le rapport des flammes de jet d'hydrogène visibles à infrarouges (à l'aide de techniques spéciales ou de nuit) est de 0,88 et le rapport de la longueur de flamme ultraviolette à infrarouge est de 0,78 [18]. Néanmoins, les flux thermiques convectifs et radiatifs restent importants et doivent être évalués vis-à-vis de la protection des personnes, des biens et de l'environnement.

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

Les personnes qui ne sont pas en contact direct avec les flammes d'hydrogène risquent d'être exposées à des flux thermiques radiatifs élevés suffisamment longtemps pour provoquer des brûlures au premier, au deuxième ou au troisième degré. Le Tableau 6 résume les effets de différents niveaux de flux radiatifs sur les personnes ; ces niveaux peuvent être utilisés en tant que critères de danger [19].

Les critères d'acceptation sont définis comme suit :

- Un flux thermique de  $1,5 \text{ kW/m}^2$  est considéré comme sûr pour le grand public (à titre de comparaison, la chaleur rayonnante du soleil lors d'une journée chaude présente une intensité moyenne de  $1,3 \text{ kW/m}^2$ ) [1].
- Certaines normes proposent des limites d'exposition relatives à la peau non protégée qui peuvent servir de guide. Par exemple, les normes britanniques [13] suggèrent un flux thermique radiatif de  $2,5 \text{ kW/m}^2$  ; au-delà de cette valeur, il existe un risque de douleur intense. À cette intensité, le temps de tolérance s'élève à 5 minutes [13]. Néanmoins, une exposition à ce niveau d'intensité peut entraîner différents degrés de brûlures en fonction du temps d'exposition. Il s'agit d'une intensité tolérable pour un occupant. Au-delà de cette valeur de flux thermique ou de durée d'exposition, il convient de calculer la dose reçue pour évaluer l'impact sur les personnes [1].
- Le flux thermique de  $5 \text{ kW/m}^2$  représente un seuil de tolérance pour les intervenants portant des vêtements de protection. Toutefois, il convient d'éviter toute exposition prolongée à cette intensité.
- L'intensité de  $6 \text{ kW/m}^2$  est tolérable pour les occupants lors de l'évacuation et doit être considérée comme une valeur seuil importante. Pour cette intensité, une personne ressent de la douleur en l'espace de 12 secondes et encourt un risque mortel au bout d'environ 38 secondes [1].

Tableau 6. Impact du flux thermique radiatif sur les personnes\* [19]

| Intensité du flux thermique radiatif, $\text{kW/m}^2$ | Effets sur les personnes   |
|---|--|
| 1,5   | Pas de danger ; sans danger pour le grand public et pour le personnel stationnaire   |
| 2,5   | Intensité tolérable pendant 5 minutes ; douleur sévère au-delà de cette durée d'exposition   |
| 3   | Intensité tolérable pendant 30 minutes en cas de situations d'urgence non fréquentes   |
| 5   | Douleur en cas d'exposition de 20 secondes, brûlures au premier degré. Intensité tolérable pour les personnes effectuant des interventions d'urgence |
| 6   | Intensité tolérable pour le personnel d'urgence qui s'échappe  |
| 9,5   | Brûlures au deuxième degré au bout de 20 secondes  |
| 12,5-15   | Brûlures au premier degré au bout de 10 secondes, 1 % de décès au bout de 1 minute   |
| 25  | Blessures importantes au bout de 10 secondes, 100 % de décès au bout de 1 minute   |

\*Ces valeurs sont des valeurs génériques relatives aux incendies d'hydrocarbures

Les valeurs seuils peuvent varier d'un pays à l'autre. Par exemple, selon la doctrine française, les valeurs seuils sont fixées à 3, 5 et 8 kW/m<sup>2</sup> [8]. Le Manuel de gestion des incidents impliquant des pipelines - Carte d'action du gaz naturel HP du SPF intérieur (Belgique) indique que le seuil de douleur est atteint suite à une exposition à un rayonnement thermique de 3 kW/m<sup>2</sup> pendant 10 secondes pour une peau non protégée. Ce seuil est ramené à 5 secondes lorsque l'intensité du rayonnement thermique passe à 5 kW/m<sup>2</sup>. En l'absence de protection, la valeur limite de l'intensité maximale acceptable du rayonnement thermique s'élève à 10 kW/m<sup>2</sup> [44]. L'Annexe 1 présente les corrélations entre le flux thermique et la distance, lors de la combustion d'une fuite d'hydrogène au niveau d'un pipeline, en fonction du diamètre de la fuite et de la pression dans le réservoir de stockage selon la doctrine française.

Le niveau de danger dépend non seulement de l'intensité du flux thermique mais également de la durée d'exposition. Dans cette optique, la nocivité de la chaleur rayonnante est souvent exprimée en termes d'unité de dose thermique, qui combine l'intensité et le temps [19], conformément à l'équation (3) :

$$\text{unité de dose thermique : } UDT = I^{4/3} \times t \quad (3)$$

où  $I$  correspond au flux radiatif (en kW/m<sup>2</sup>) et  $t$  à la durée d'exposition (en secondes), 1 unité de dose thermique (UDT) = 1 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>s.

Pour les intervenants, il est essentiel de connaître les dangers liés à la dose pour les différentes longueurs d'onde du rayonnement. Comme indiqué précédemment, un incendie d'hydrogène émet un rayonnement plus important dans la partie UV du spectre que dans la partie IR. Le Tableau 7 indique les valeurs des unités de dose thermique entraînant des brûlures au 1<sup>er</sup>, au 2<sup>ème</sup> et au 3<sup>ème</sup> degré uniquement pour la gamme du spectre ultraviolet (UV) et uniquement pour la gamme du spectre infrarouge (IR). Le flux thermique du spectre IR est le plus susceptible de provoquer des brûlures cutanées à une valeur de dose bien inférieure à celle du spectre UV. De nombreux facteurs influent sur les valeurs seuils indiquées dans le Tableau 7, notamment le type de source de chaleur et le type de peau animale utilisé dans le cadre des expériences [19].

Tableau 7. Données relatives aux brûlures par irradiation [19]

| Gravité de la brûlure  | Seuil de dose thermique, (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> s |            |
|------------------------|--|------------|
|                        | Ultraviolet  | Infrarouge |
| <b>Premier degré</b>   | 260-440  | 80-130     |
| <b>Deuxième degré</b>  | 670-1 100  | 240-730    |
| <b>Troisième degré</b> | 1 220-3 100  | 870-2 640  |

Deux paramètres peuvent être utilisés en tant que critères de danger mortel : 1) la « dose dangereuse », qui correspond au niveau de dose entraînant la mort de 1 % de la population exposée, et 2) la dose létale « LD50 », qui indique une dose à laquelle on s'attend à une

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

mortalité d'environ 50 % parmi la population exposée. La dose dangereuse et la dose létale LD50 ont été rapportées dans la littérature. Par exemple, Rew [16] a suggéré que 2 000 UDT équivalaient à la dose létale LD50 pour le rayonnement thermique incident à terre. Il convient de noter que la valeur LD50 de  $3\,600 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$  rapportée par Lees [24] semble beaucoup plus élevée que celle de  $2\,000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$  [16]. Ainsi, O'Sullivan et Jagger [20] et Chang et al. [21] ont fait état d'une valeur indicative de 3 500 UDT correspondant à une mortalité de 100 % pour le personnel portant des vêtements de protection. Cependant, une mortalité de 100 % peut également être observée à des doses légèrement inférieures. À 3 500 UDT, les vêtements s'enflamment en l'absence de flamme préexistante, ce qui laisse supposer que 100 % des personnes portant des vêtements décéderont. À ce niveau de dose thermique, l'auto-extinction est peu probable en raison des blessures provoquées par la chaleur transmise par les vêtements. Au Royaume-Uni, le HSE (Health and Safety Executive) a proposé d'utiliser une valeur  $\text{LD50} = 2\,000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$  pour les installations pétrolières et gazières offshore.

### 4.4 Effets des surpressions sur les êtres humains

Les niveaux de surpression induits par la combustion de l'hydrogène varient considérablement et dépendent du scénario de l'accident. Le moins dangereux de ces effets est l'*incendie instantané* qui se produit lorsque l'hydrogène se consume rapidement sous la forme d'une combustion par diffusion (non prémélangée) tandis qu'il est libéré (par exemple, à travers une canalisation ou une vanne brisée ou à travers un joint défectueux). Les incendies instantanés, à l'instar des incendies classiques, ne produisent pas d'ondes de pression importantes et le niveau de surpression est généralement très faible.

Il se produit des *explosions de nuage de vapeur* lorsque l'hydrogène libéré se mélange à l'air pour former un nuage inflammable avant de s'enflammer. « Les effets de surpression produits par l'explosion d'un nuage de vapeur sont extrêmement variables et sont déterminés par la vitesse de propagation de la flamme. Dans la plupart des cas, une *déflagration* se produit lorsque le front de flamme est subsonique. Une détonation implique un front de flamme supersonique et donne lieu à des surpressions importantes » [19].

Le niveau de surpression généré peut varier considérablement selon le scénario et peut être influencé par de nombreux facteurs, notamment le degré de confinement, les turbulences, la présence d'obstacles, le volume et la concentration du mélange inflammable, la vitesse de propagation de la flamme, etc.

Les libérations d'hydrogène qui ont lieu dans des espaces confinés présentent un potentiel explosif plus important que celles qui se produisent à l'air libre. L'inflammation retardée d'un jet d'hydrogène ou l'inflammation d'un nuage inflammable entraîne une surpression, qui peut à son tour porter préjudice aux personnes et aux biens. Dans le pire des cas, c'est-à-dire en cas de rupture catastrophique d'un réservoir de stockage d'hydrogène, une *onde de choc* et une *boule de feu* seront produites.

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

Les effets des événements de surpression sur les êtres humains peuvent être directs ou indirects. Le principal effet direct est l'augmentation importante et soudaine de la pression, qui peut endommager les organes sensibles à la pression tels que les poumons et les oreilles. Les effets indirects comprennent l'impact des projectiles et des débris consécutifs aux dommages provoqués à l'équipement, le déplacement d'objets, l'effondrement de la structure, etc. Les grandes explosions peuvent projeter une personne à plusieurs mètres de distance [19]. Les forces de traînée étant suffisamment puissantes pour déplacer des objets de grande taille, une personne peut également devenir un projectile. Les lésions subies sont appelées lésions de déplacement car le corps humain est littéralement soulevé et déplacé. La vitesse à laquelle le corps est déplacé détermine la gravité de la lésion. 50 % des personnes ayant subi une lésion de déplacement à une vitesse supérieure à 0,6 m/s souffriront de blessures légères ; 1 % des personnes ayant subi une lésion de déplacement à une vitesse d'environ 4 m/s souffriront de blessures telles que des hémorragies et des fractures osseuses [1]. Deux facteurs peuvent être à l'origine des lésions : le *niveau de surpression* et la durée pendant laquelle la pression est élevée (*l'impulsion*). Les Tableaux 8 et 9 récapitulent les valeurs de surpression liées aux effets directs et indirects nocifs pour l'être humain.

Tableau 8. Effets directs de la surpression sur les personnes [19]

| $\Delta p$ , kPa | Description des dommages   |
|------------------|--|
| 8                | Pas de blessures graves pour les personnes se trouvant à l'extérieur                                     |
| 10               | Blessures graves pour les personnes se trouvant à l'intérieur, peu de décès                              |
| 13,8             | Seuil de rupture du tympan   |
| 20               | Seuil de survie (probabilité de décès de 20 % à l'intérieur ; probabilité de décès de 0 % à l'extérieur) |
| 34,5-48,3        | Probabilité de rupture du tympan de 50 %   |
| 54               | Blessure mortelle à la tête  |
| 68,9-103,4       | Probabilité de rupture du tympan de 90 %   |
| 70               | Probabilité de décès de 100 % à l'intérieur  |
| 82,7-103,4       | Seuil d'hémorragie pulmonaire (blessures graves ou décès)  |
| 137,9-172,4      | Probabilité de décès par hémorragie pulmonaire de 50 %   |
| 206,8-241,3      | Probabilité de décès par hémorragie pulmonaire de 90 %   |
| 48,3             | Seuil de blessures internes découlant de l'explosion   |
| 482,6-1 379      | Décès immédiats découlant de l'explosion   |

Comme le montre le Tableau 8, l'hémorragie pulmonaire et la rupture du tympan découlant de la surpression constituent les principaux effets directs. Il est important de rappeler que les explosions blessent davantage les personnes lorsqu'elles ont lieu à l'intérieur d'un bâtiment plutôt qu'à l'extérieur, du fait des effets indirects plus importants causés par la destruction du bâtiment, dont la formation de projectiles (éclats). En effet, les niveaux de pression susceptibles de blesser directement les êtres humains sont beaucoup plus élevés que ceux susceptibles d'endommager les bâtiments.

Tableau 9. Effets indirects de la surpression sur les personnes [19]

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

| $\Delta p$ , kPa | Description des dommages  |
|------------------|---|
| 3,0              | Blessures par éclats de verre   |
| 6,9-13,8         | Seuil de lacération de la peau par les projectiles                              |
| 10,3-20,0        | Personnes frappées par l'onde de pression                                       |
| 13,8             | Possibilité de décès par projection contre des obstacles                        |
| 27,6-34,5        | Probabilité de décès de 50 % suite à des blessures causées par des projectiles  |
| 48,3-68,9        | Probabilité de décès de 100 % suite à des blessures causées par des projectiles |
| 55,2-110,3       | Personnes debout projetées à distance   |

Pour les personnes se trouvant à l'intérieur et tout particulièrement derrière les fenêtres, une surpression de 3 kPa peut provoquer des blessures par éclats de verre, tandis qu'une surpression de 10 kPa représente le seuil de blessure grave. Pour les personnes situées à l'extérieur, une surpression de 8 kPa n'entraîne pas de blessures graves (Tableaux 8 et 9). Le seuil de survie s'élève à 21 kPa ; toutefois, d'autres sources recommandent d'utiliser des valeurs comprises entre 14 et 20 kPa [8]. Le seuil de rupture du tympan s'élève à 13,8 kPa. L'intervalle compris entre 34,5 et 48,3 kPa correspond à une probabilité de rupture du tympan de 50 %, ce qui peut entraîner la surdité, des acouphènes ainsi que des vertiges. Ces effets physiologiques représentent une menace pour les occupants qui tentent de s'échapper. Ces derniers seront désorientés et incapables de communiquer. En cas de vertige, il peut s'avérer dangereux d'emprunter les escaliers ou les voies d'évacuation. Il est intéressant de noter qu'en termes de sécurité, les effets indirects des explosions sont plus importants. « Les lésions indirectes dues à l'explosion sont si nombreuses que seules très peu de personnes ne subissent que des lésions directes » [26]. Les effets directs des surpressions ne s'étendent pas aussi loin du point d'explosion que les autres effets et sont souvent dissimulés par les effets de la force de traînée [27]. L'Annexe 2 présente les recommandations françaises relatives aux distances par rapport aux surpressions.

L'un des principaux effets indirects de la surpression est la projection de débris volants (également appelés projectiles). Le niveau d'atteinte corporelle dépend de la taille et du poids des débris, de la vitesse d'impact et de l'endroit de l'impact sur le corps humain [28]. La vitesse d'accélération du projectile est le principal facteur de l'atteinte corporelle. La probabilité de plaie pénétrante augmente avec la vitesse, notamment lorsqu'il s'agit de projectiles de petite taille tels que des éclats de verre. Il se peut que les projectiles lourds ne provoquent pas de blessures par pénétration mais des blessures plus graves telles que des fractures [26]. Pour les fractures du crâne causées par des projectiles de 4,5 milligrammes, le seuil de vitesse ne s'élève qu'à 4,6 m/s [26]. Cependant, en raison du manque de modèles dûment validés, il est encore difficile d'évaluer pleinement l'impact des projectiles sur les personnes [1].

L'onde de choc produite lors d'une explosion est de très courte durée (dans la plupart des cas, elle est inférieure à une seconde). D'un point de vue physique, cela ne permet pas aux occupants de s'échapper vers un endroit sûr. Il est donc impossible d'évaluer la durée de l'exposition des personnes à l'onde de choc, car il s'agit d'un événement quasiment instantané. Cependant, la



## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

durée de la phase positive de la surpression peut être utilisée pour évaluer les dommages. Par exemple, Lees [29] a déterminé une probabilité de survie et un seuil de lésion pulmonaire due à l'onde de choc en fonction de la surpression (axe vertical) et de la durée de la phase positive de la surpression (axe horizontal) ; reportez-vous à la Figure 5. À pression constante, plus l'impulsion est longue, plus l'impact est grave.

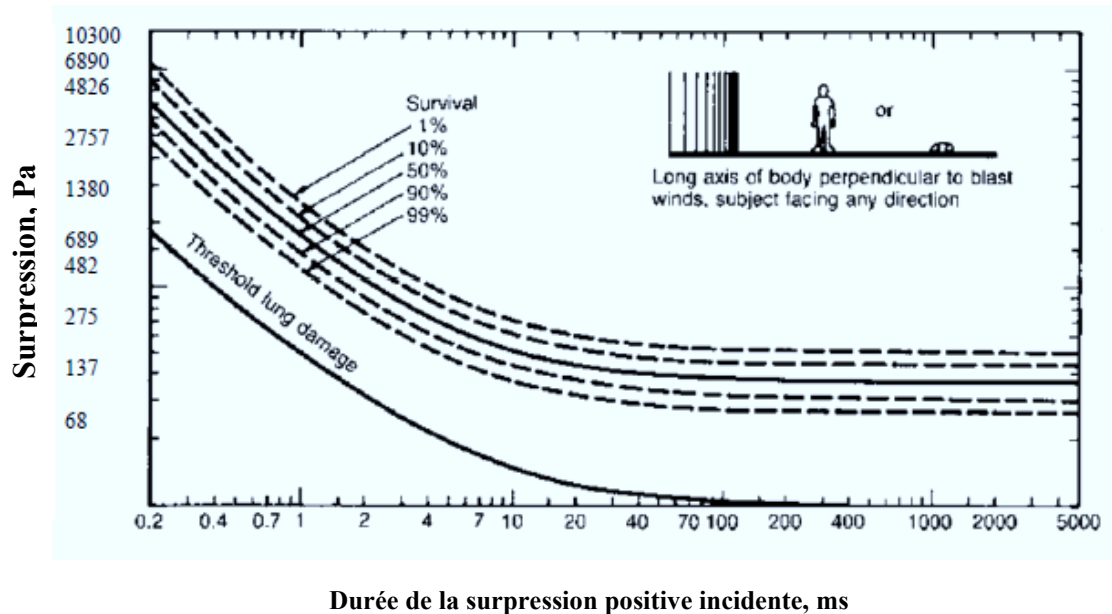


Figure 5. Effet de la surpression et de l'impulsion combinées [29]

Les critères d'acceptation des valeurs de surpression sont indiqués ci-dessous. Ces valeurs doivent être considérées comme des recommandations.

- Une surpression de 1 kPa correspond à la valeur de tolérance des occupants situés à l'intérieur. Ce niveau correspond à la rupture de 5 % des fenêtres [30].
- Une surpression de 1,35 kPa et des impulsions de 1 Pa s peuvent être considérées comme le seuil d'« absence de danger » pour les êtres humains [31].
- Une surpression de 8 kPa correspond à la valeur de tolérance des occupants situés à l'extérieur [1].
- Une surpression de 10 kPa correspond à la valeur maximale que peuvent supporter les occupants situés à l'intérieur. Au-delà de ce seuil, il existe un risque de blessures graves et de décès [1].
- Une surpression de 21 kPa correspond au seuil de survie pour les occupants situés à l'extérieur. Ce seuil n'entrave pas la motricité et présente une faible probabilité de blessures ou de décès.
- Une surpression de 21 kPa correspond également au seuil de survie pour les premiers secours, car leur EPI ne les protège pas des effets de la surpression.
- Une surpression de 34 kPa correspond à la valeur maximale que peuvent supporter les occupants situés à l'extérieur. Les niveaux de surpression supérieurs à 34 kPa ont un impact physiologique sur les occupants pendant les procédures d'évacuation. Il s'agit

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

d'une valeur prudente vis-à-vis de la probabilité de mortalité de 1 % ainsi que de la probabilité de décès par hémorragie pulmonaire de 1 % (99 kPa) indiquées dans la référence [29].

### 5. Dommages causés aux structures, aux équipements et à l'environnement par les incendies d'hydrogène

Les critères de dommages causés aux structures, aux équipements et à l'environnement par les incendies d'hydrogène peuvent être exprimés en termes d'exposition au flux thermique radiatif ou aux flammes directes. Les incidences de l'intensité du flux thermique radiatif sur les structures, les équipements et l'environnement sont récapitulées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Incidences du flux thermique radiatif sur les structures, les équipements et l'environnement [19, 29]

| Flux thermique radiatif, kW/m <sup>2</sup> | Effet sur les structures, les installations, les équipements et l'environnement   |
|--|---|
| 4  | Bris de verre (exposition de 30 minutes)  |
| 5  | Bris de vitres important  |
| 8-12                                       | Seuil d'intensité du rayonnement capable de provoquer un effet domino   |
| 10   | Réchauffement des structures ; augmentation de la température et de la pression dans les réservoirs de stockage de LH <sub>2</sub> /GH <sub>2</sub> |
| 10-12                                      | Inflammation de la végétation   |
| 10 ou 20                                   | Inflammation de combustible ou d'huile (120 ou 40 secondes, respectivement)   |
| 12,5-15                                    | Inflammation du bois en présence d'une flamme préexistante ; fusion des matières plastiques (> 30 minutes d'exposition)                             |
| 16   | Défaillance des structures (à l'exception du béton) en cas d'exposition prolongée   |
| 18-20                                      | Dégradation de l'isolation des câbles (> 30 minutes d'exposition)   |
| 20   | Intensité à laquelle les structures en béton peuvent résister pendant plusieurs heures  |
| 25-32                                      | Inflammation du bois en l'absence de flamme préexistante ; déformation de l'acier (> 30 minutes d'exposition)                                       |
| 35-37,5                                    | Dégradation de l'équipement de traitement et dommages structurels, y compris au niveau des réservoirs de stockage (> 30 minutes d'exposition)       |
| 100  | Effondrement de la structure en acier (> 30 minutes d'exposition)   |
| 200  | Défaillance des structures en béton (en plusieurs dizaines de minutes)  |

Les critères d'acceptation sont énumérés ci-dessous :

- 5 kW/m<sup>2</sup> - seuil de dommages légers ; cette intensité correspond à un bris de vitre.
- 10 kW/m<sup>2</sup> - seuil de dommages modérés ; cette intensité correspond au niveau de flux thermique entraînant le réchauffement des structures et l'augmentation significative de la pression à l'intérieur du réservoir de stockage de liquide ou de gaz.
- 10 kW/m<sup>2</sup> - seuil de zone sensible.
- Les seuils d'effondrement dépendent fortement de la nature du matériau : les structures qui ne sont pas construites en béton s'effondrent à 16 kW/m<sup>2</sup> en cas d'exposition prolongée, tandis que les structures en béton s'effondrent à 200 kW/m<sup>2</sup>.



## 6. Impact de la surpression sur les structures et les équipements

Les valeurs de surpression peuvent fournir aux premiers secours des indications sur le niveau de destruction. Une surpression d'environ 3 à 6 kPa entraînerait des dommages structurels mineurs, tandis qu'une surpression comprise entre 80 et 260 kPa entraînerait une démolition complète.

Les seuils relatifs à l'endommagement des bâtiments suggérés par Mannan [32] sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11. Seuils de surpression entraînant l'endommagement des bâtiments suggérés par Mannan [32]

| Surpression, kPa | Niveau de dommages  |
|------------------|---|
| 4,8              | Dommages mineurs causés à la maison                       |
| 6,9              | Démolition partielle de la maison, décombres inhabitables |
| 34,5-48,3        | Destruction pratiquement totale de la maison              |

Ces valeurs ont été récemment adaptées par Molkov et Kashkarov [33] aux fins de l'évaluation des distances de séparation par rapport à l'onde de choc produite par l'éclatement d'un réservoir de stockage d'hydrogène à haute pression. Les détails de cette méthode seront examinés de manière plus approfondie dans le cours consacré aux détonations et aux déflagrations d'hydrogène.

Le Tableau 12 récapitule les différents effets de la surpression sur les structures rapportés dans la littérature [29, 30]. Les vitres sont particulièrement susceptibles de se briser à de faibles niveaux de surpression [1]. N'oubliez pas que les éclats de verre peuvent se transformer en projectiles et blesser les gens.

Tableau 13. Réaction des éléments structurels aux différents niveaux de surpression

| Éléments | Surpression, kPa | Description des dommages   |
|----------|------------------|--|
| Vitre    | 0,7 - 1,0        | 5 % de bris  |
|          | 1,4 - 3,0        | 50 % de bris   |
|          | 3,0 - 6,0        | 90 % de bris   |
| Bâtiment | 1,4 - 3,0        | Habitable suite à la réparation des plafonds, des fenêtres et du carrelage   |
|          | 3,0 - 6,0        | Dommages structurels mineurs limités. Les cloisons et les menuiseries ont été arrachées de leurs fixations. Endommagement du plafond de la maison. 90 % des vitres sont brisées                                  |
|          | 6,0 - 9,0        | Les cadres des portes et des fenêtres sont cassés  |
|          | 9,0              | L'armature en acier du bâtiment est légèrement déformée  |
|          | 14 - 28          | Inhabitable ; effondrement partiel ou total de la toiture, démolition partielle d'un ou deux murs extérieurs, endommagement important des cloisons porteuses. Murs en béton ou en parpaings non renforcés brisés |

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

|          |   |
|----------|---|
| 30       | Destruction de tous les bâtiments qui n'ont pas été conçus pour résister aux explosions |
| 35 - 80  | 50 % à 75 % de la maçonnerie extérieure détruite ou rendue dangereuse                   |
| 80 - 260 | Démolition presque totale   |
| 50 - 100 | Déplacement des réservoirs de stockage cylindriques, rupture des tuyaux                 |

Dans le Tableau 13, Stephen [34] et Lees [29] indiquent les valeurs maximales de surpression et les niveaux de dommages causés aux structures.

Tableau 13. Classification des dommages causés aux structures pour différentes surpressions

| Surpression, kPa | Niveau de dommages |
|------------------|--------------------|
| moins de 3,5     | Dommages légers    |
| plus de 17       | Dommages modérés   |
| plus de 35       | Dommages graves    |
| plus de 83       | Destruction totale |

En France, des directives relatives aux critères de conséquences permettent de déterminer l'effet domino (par exemple,  $8 \text{ kW m}^{-2}$  pour le rayonnement thermique, 200 mbar pour la surpression) [43]. Comme indiqué précédemment, les valeurs seuils dépendent des réglementations nationales. L'Annexe 3 présente des exemples de valeurs seuils françaises associées aux effets de la surpression sur les personnes et les structures.

Le Tableau 15 et la Figure 6 donnent des informations sur l'impact combiné de la surpression et de l'impulsion. Ces valeurs peuvent être utilisées en tant que seuils. Les valeurs de surpression et d'impulsion correspondant aux points A, B, C et D du Tableau 14 sont également représentées sur la Figure 6 et sont en adéquation avec les niveaux de dommages 1, 2 et 3 (reportez-vous à la légende de la Figure 6). La Figure 6 peut servir à estimer les niveaux de dommages causés aux bâtiments pour des pics de surpression et d'impulsion spécifiques.

Tableau 14. Effet combiné de la surpression et de l'impulsion sur le niveau de dommages [1]

| Pic de surpression, kPa | Impulsion, kPa·s | Description des dommages  | Point sur la Figure 12 |
|-------------------------|------------------|---|------------------------|
| 3,6                     | 0,10             | Limite des dommages structurels mineurs                                       | A                      |
| 14,6                    | 0,30             | Seuil de dommages structurels modérés : rupture de certains éléments porteurs | B                      |
| 34,5                    | 0,52             | Seuil de destruction partielle : 50 % à 75 % des murs détruits                | C                      |
| 70,1                    | 0,77             | Destruction totale des bâtiments  | D                      |

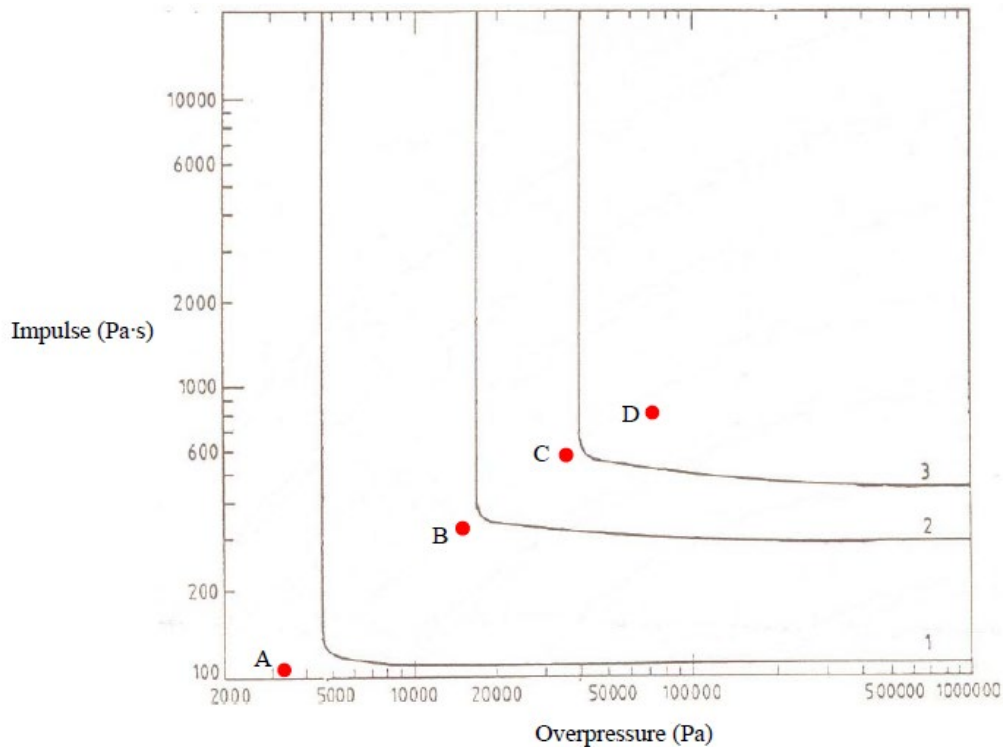


Figure 6. Schéma de surpression et d'impulsion d'une charge explosive sur le sol endommageant progressivement les maisons : niveau 1 - dommages légers ; niveau 2 - dommages structurels ; 3 - effondrement [35]

Les critères d'acceptation sont les suivants :

- Le seuil de dommages légers s'élève à 3 kPa pour une impulsion supérieure à 100 Pa·s. À ce niveau de surpression, l'infrastructure est habitable suite à la réparation des plafonds, des fenêtres et du carrelage.
- Le seuil de dommages modérés s'élève à 15 kPa pour une impulsion supérieure à 300 Pa·s.
- Le seuil d'effondrement des structures civiles s'élève à 35 kPa pour une impulsion supérieure à 500 Pa·s.
- Le seuil de zone sensible s'élève à 20 kPa.

Voici quelques exemples d'accidents impliquant des systèmes d'hydrogène et ayant occasionné des dommages structurels ainsi que des pertes humaines :

- Explosion d'un réservoir d'hydrogène (15 tonnes) dans une usine chimique, 1953. Nagoya, Japon. 16 personnes sont décédées et 230 personnes ont été grièvement blessées. Pour obtenir plus de détails, suivez le lien : <https://www.youtube.com/watch?v=eGAfBi6KyMw>
- Incendie et explosion d'hydrogène dans un grand complexe pétrochimique. 1984 ; Polysar Ltd, Sarnia, Canada. Environ 30 kg d'hydrogène gazeux se sont déversés à travers

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

une bride qui a éclaté dans l'entrepôt abritant un compresseur fonctionnant à 4 800 kPa. 2 personnes sont décédées et 2 personnes ont été blessées. Des dommages structurels importants ont été observés dans la zone de proximité ; bris de verre et dommages structurels mineurs jusqu'à 1 km.

- Explosion d'hydrogène au sein de la très critique Unité 5 de 585 MW de la centrale électrique à charbon de Muskingum River, 2007. Ohio, États-Unis. L'explosion a eu lieu au cours d'une livraison d'hydrogène de routine, lorsqu'un dispositif de décompression est tombé en panne. Le contenu du réservoir d'hydrogène s'est alors déversé et a été enflammé par une source inconnue. 1 personne est décédée et 10 personnes ont été blessées. Plusieurs bâtiments ont été gravement endommagés. Pour obtenir plus de détails, suivez le lien : <http://www.powermag.com/lessons-learned-from-a-hydrogen-explosion/>

## 7. Résumé des critères d'acceptation relatifs à la sécurité des personnes et aux pertes matérielles

Le Tableau 15 résume les valeurs de seuil (c'est-à-dire les critères d'acceptation relatifs à la sécurité des personnes et aux pertes matérielles) abordées précédemment. Ces valeurs doivent être utilisées à titre indicatif et non comme des valeurs numériques absolues.

Tableau 15. Valeurs de définition des critères d'acceptation relatifs à la sécurité des personnes et aux pertes matérielles

| Emplacement                                | Danger pour la sécurité des personnes                           | Seuil     | Premiers secours | Occupant | Grand public |
|--|---|-----------|------------------|----------|--------------|
| À l'intérieur et à l'extérieur             | Concentration en hydrogène, % en volume                         | Tolérable | 9                | 28       | 9            |
|  |   | Maximum   | -                | 40       | -            |
|  | Température de l'air, °C  | Tolérable | 149              | 115      | 70           |
|  |   | Maximum   | -                | 149      | -            |
|  | Flux thermique radiatif direct, kW/m <sup>2</sup>               | Tolérable | 5                | 2,5      | 1,5          |
|  |   | Maximum   | -                | 6        | -            |
|  | Surpression directe, kPa  | Tolérable | 8                | 21       | 8            |
|  |   | Maximum   | -                | 34       | -            |
|  | Surpression indirecte - projectiles provenant des fenêtres, kPa | Tolérable | 1                | 1        | 1            |
|  |   | Maximum   | -                | 10       | -            |
| Danger pour les biens                      |   | Seuil     | Valeurs          |          |              |
| Flux thermique radiatif, kW/m <sup>2</sup> | Dommages légers   | 3         |                  |          |              |
|  | Dommages modérés  | 10        |                  |          |              |
|  | Zone sensible   | 10        |                  |          |              |
|  | Effondrement  | 16-200    |                  |          |              |
| Surpression, kPa                           | Dommages légers   | 6         |                  |          |              |

|                  |    |
|------------------|----|
| Dommages modérés | 15 |
| Zone sensible    | 20 |
| Effondrement     | 35 |

## 8. Étiquetage des systèmes d'hydrogène

Les pictogrammes relatifs au transport commercial de l'hydrogène sont reproduits sur la [Figure 7](#), sur laquelle la valeur « 1049 » désigne l'hydrogène gazeux, tandis que la valeur « 1966 » désigne l'hydrogène liquide [36].

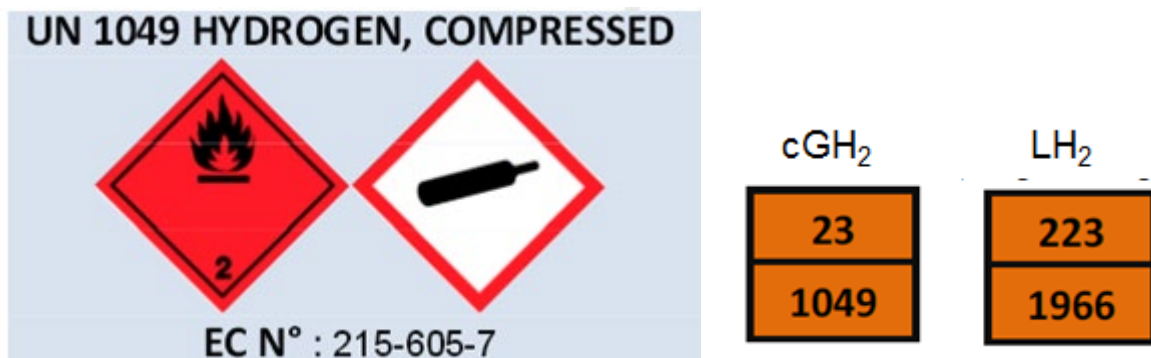


Figure 7. Exemples de pictogrammes utilisés dans le cadre du transport de l'hydrogène.

Pour les véhicules à pile à combustible, le règlement de l'UE n° 406/2010 recommande d'utiliser des losanges verts à bordure blanche et d'écrire les mentions « H2 GAZEUX » ou « H2 LIQUIDE » en lettres blanches [37]. Au sein de l'UE, l'uniformisation de la signalisation a été initiée par la Commission pour la désincarcération et les nouvelles technologies de la CTIF (Organisation internationale des sapeurs-pompiers) [38]. Il est important de noter que les conseils fournis ne sont pas juridiquement contraignants et que leur suivi repose sur la bonne volonté de chacun. La norme ISO 17840-4 - Identification de l'énergie de propulsion définit les étiquettes et les couleurs correspondantes qui permettent d'indiquer le carburant et/ou l'énergie utilisés pour la propulsion d'un véhicule routier, notamment dans le cas d'une nouvelle technologie de véhicule et/ou de nouvelles sources d'énergie, y compris les chaînes cinématiques hybrides (reportez-vous à la [Figure 8](#)). La communication sur l'énergie de propulsion et les dangers qui y sont liés a lieu de manière logique et modulaire afin de faciliter la compréhension. Ce document s'applique aux véhicules de tourisme, aux bus, aux autocars et aux véhicules utilitaires légers et lourds conformément à la norme ISO 3833. Il n'aborde pas les combustibles liés aux cargaisons par camions. Les étiquettes sont également associées aux fiches de secours (ISO 17840-1 et ISO 17840-2) et aux guides d'intervention d'urgence (ISO 17840-3).

Les principales étapes de conception des symboles d'identification des dangers sont présentées sur la [Figure 8](#) et la [Figure 9](#). Ces couleurs sont les mêmes que celles utilisées dans le cadre des informations de sauvetage et pour les composants des véhicules (Fiches de secours).

|        |              |
|--------|--------------|
| GREY   | DIESEL       |
| RED    | GASOLINE     |
| GREEN  | GAS          |
| WHITE  | CRYOGEN LNG  |
| BLUE   | HYDROGEN     |
| ORANGE | HIGH VOLTAGE |

**SYMBOLS**














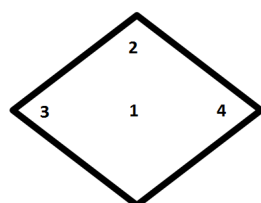
- 1) FIRST ENERGY SOURCE:    CNG LNG LPG
- 2) SECOND ENERGY SOURCE:    
- 3) DENSITY COMPARED TO AIR:   
- 4) STORED AGREGATE STATE:   



Figure 8. Couleurs et symboles proposés par la CTIF pour l'élaboration de panneaux standardisés



|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1 | First energy source     |
| 2 | Second energy source    |
| 3 | Density compared to air |
| 4 | Stored aggregate state  |

Figure 9. Forme de losange proposée par la CTIF pour l'identification des dangers liés aux véhicules [38]

Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

La **Figure 10** représente la version la plus récente d'une étiquette pour véhicule à pile à combustible indiquant deux sources d'énergie principales : l'hydrogène (au centre) et l'électricité (dans l'angle supérieur). Le symbole situé dans l'angle de gauche indique que la première source d'énergie (c'est-à-dire l'hydrogène) est plus légère que l'air. Le symbole situé dans l'angle de droite indique qu'il s'agit d'un gaz comprimé. Les étiquettes conformes à la norme ISO 17840-4 fournissent aux intervenants des informations utiles concernant les dangers. Ces informations sont en outre visibles de loin.



Figure 10. Symbole élaboré par la CTIF pour les véhicules à pile à combustible alimentés par de l'hydrogène gazeux comprimé [38]

Les exemples de symboles proposés par la CTIF pour les autres types de véhicules, les véhicules classiques et hybrides, sont présentés sur la **Figure 11**.

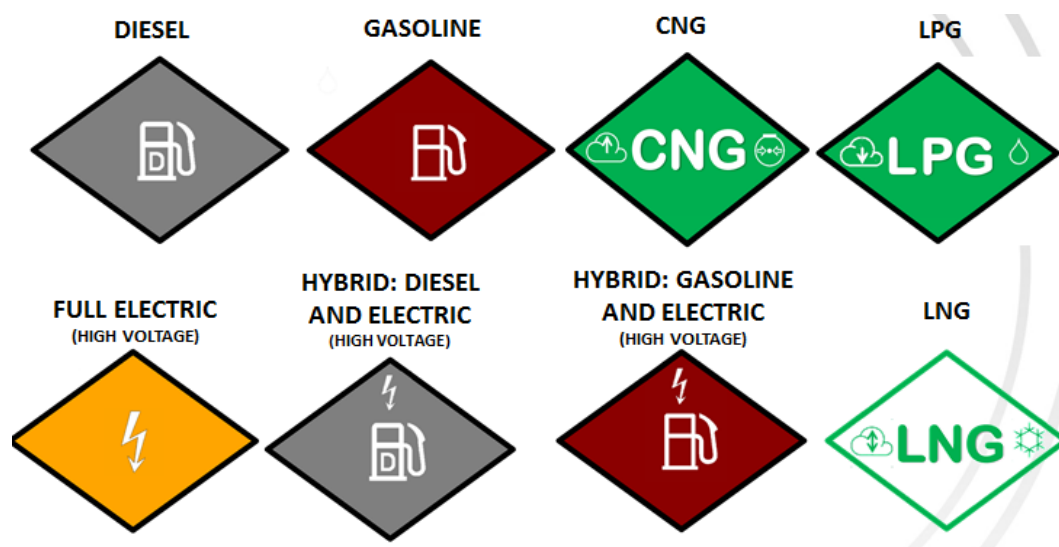


Figure 11. Symboles élaborés par la CTIF pour différents types de combustibles/d'énergies pour véhicules [38]





Figure 12. Méthodes officielles d'identification utilisées aux États-Unis [36]

Veillez noter qu'aux États-Unis, les intervenants doivent se reporter à la norme NFPA, qui indique quand et comment utiliser les méthodes « OFFICIELLES » et « NON OFFICIELLES » d'identification des véhicules [36]. Les *autocollants* et les graphiques apposés sur de nombreux véhicules et bus constituent une méthode d'identification officielle. Il s'agit par exemple des sigles « FCEV » et « FC », l'abréviation des expressions « Fuel Cell » (pile à combustible) ou « Hydrogen Fuel Cell » (pile à hydrogène). Toutefois, ce n'est pas toujours le cas à mesure que l'on approche de la commercialisation. Par exemple, la Honda FCX Clarity louée aux conducteurs du sud de la Californie ne comporte pas ces autocollants. En revanche, elle présente un *marquage* de véhicule à côté de la marque et du modèle, comme n'importe quel autre véhicule (Figure 12). Ceci est conforme à la norme internationale SAE [36].

## 9. Équipement de protection individuelle

Concernant les exigences de performance des EPI de lutte contre les incendies, il convient de citer deux normes européennes importantes. La norme (NF) EN 469:2006-02 [39] présente les exigences relatives aux vêtements de protection des sapeurs-pompiers, tandis que la norme (NF) EN 136: 1998 [40] présente les exigences relatives aux appareils de protection respiratoire. Selon les exigences de résistance à la chaleur de la norme (NF) EN 469:2006-02, pour une durée d'exposition de 5 minutes à une température de  $180 \pm 5$  °C, les matériaux utilisés dans l'assemblage des vêtements ne doivent pas s'enflammer ni fondre et ne doivent pas rétrécir de plus de 5 % dans le sens de la machine ou dans le sens transversal [39]. Veillez noter que le flux thermique incident est limité à un niveau nominal de  $80 \text{ kW/m}^2$ .

Les résultats des essais sont exprimés sous forme d'indice de transfert thermique ( $\text{HTI}_{24}$ ) ; il s'agit du temps (en secondes) nécessaire pour que la température d'un calorimètre atteigne 24 °C. Pour la classification des vêtements de lutte contre l'incendie, le temps (en secondes) correspondant à une augmentation de température de 12 °C est également enregistré ( $\text{HTI}_{12}$ ). La réaction du matériau au transfert de chaleur (flamme) doit atteindre le niveau de performance indiqué ci-dessous [39].



## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

| <u>Level 1</u>                 | <u>Level 2</u>                 |
|--------------------------------|--------------------------------|
| $HTI_{24} \geq 9.0$            | $HTI_{24} \geq 13.0$           |
| $HTI_{24} - HTI_{12} \geq 3.0$ | $HTI_{24} - HTI_{12} \geq 4.0$ |

Pour mesurer la performance du matériau face au flux thermique radiatif, une densité de flux thermique de 40 kW/m<sup>2</sup> est utilisée. Les indices de transfert thermique radiatif (RHTI) sont mesurés. Les exigences de la norme EN 469:2006 sont indiquées ci-dessous :

| <u>Level 1</u>                   | <u>Level 2</u>                   |
|----------------------------------|----------------------------------|
| $RHTI_{24} \geq 10.0$            | $RHTI_{24} \geq 18.0$            |
| $RHTI_{24} - RHTI_{12} \geq 3.0$ | $RHTI_{24} - RHTI_{12} \geq 4.0$ |

La résistance résiduelle d'un matériau exposé à un flux thermique radiatif de 10 kW/m<sup>2</sup> doit être  $\geq 450$  N [39]. Le personnel qui intervient dans une installation ou un système d'hydrogène peut réduire les éventuelles conséquences des dangers en portant un équipement de protection approprié. Parmi les conditions dans lesquelles le personnel doit être protégé, on peut citer l'exposition à des températures cryogéniques, à des températures d'inflammation, au rayonnement thermique d'une flamme d'hydrogène et à des atmosphères pauvres en oxygène, composées d'hydrogène ou de gaz de purge inertes tels que l'azote et l'hélium. Le type d'EPI à utiliser est déterminé par la nature du travail. La norme ISO 15196 [11] présente quelques recommandations générales concernant les EPI. Ces recommandations n'incluent pas les EPI à utiliser dans le cadre d'autres activités telles que les interventions sur les circuits électriques ou les opérations de nettoyage ou de décontamination [11]. Les éléments nécessaires ou obligatoires des EPI doivent être sélectionnés en fonction des conditions sur site.

- Il convient de porter une protection oculaire, le cas échéant (par exemple, il convient de porter un écran facial complet lors du branchement ou du débranchement de conduites ou de composants, ou des lunettes de protection lors de la manipulation du LH<sub>2</sub>).
- Le port de gants de protection isolés est préconisé pour manipuler des objets qui entrent en contact avec le LH<sub>2</sub> ou le GH<sub>2</sub> froid. Les gants ne doivent pas être trop ajustés, doivent être faciles à enlever et ne doivent pas présenter de grands poignets.
- Il convient de porter un pantalon long, de préférence sans revers, en maintenant le bas du pantalon au-dessus des bottes ou des chaussures de sécurité.
- Il convient de porter des chaussures à bout fermé (les chaussures ouvertes ou poreuses sont interdites).
- Il convient de porter des vêtements en coton ordinaire, en coton ignifugé ou en matière antistatique. Il faut éviter de porter des vêtements en nylon ou autres matières synthétiques, en soie ou en laine, car ces matières peuvent générer de l'électricité statique susceptible d'enflammer les mélanges inflammables. Les matières synthétiques (vêtements) peuvent fondre et coller à la chair, aggravant ainsi les éventuelles brûlures.

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

Tout vêtement ayant reçu des jets ou des éclaboussures d'hydrogène doit être retiré jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucune trace d'hydrogène gazeux.

- Il faut éviter de porter des gants à manchette, des vêtements serrés ou des vêtements pouvant retenir ou emprisonner (par le biais de poches) le liquide contre le corps.
- Il convient de porter une protection auditive si l'installation ou le système d'hydrogène comporte des équipements émettant des bruits forts.
- Il convient de porter un casque de sécurité si l'installation ou le système d'hydrogène présente un risque de chute d'objets.
- Il convient de porter un appareil respiratoire autonome pour intervenir dans un espace confiné dont l'atmosphère est potentiellement appauvrie en oxygène.
- Il convient d'utiliser un équipement portatif de détection d'hydrogène et d'incendie afin de repérer les fuites d'hydrogène et les incendies.
- Les pompiers doivent utiliser des caméras thermiques, des lances et des canons à eau télécommandés.
- S'il soupçonne la présence d'hydrogène dans la zone, le personnel doit s'assurer d'être isolé électriquement (selon le principe de mise à la terre) avant de toucher ou d'utiliser un outil sur un système d'hydrogène.

## 10. Impact sur l'environnement

L'hydrogène ne contamine pas les eaux souterraines (dans des conditions atmosphériques normales, il s'agit d'un gaz) et les libérations d'hydrogène ne contribuent pas à la pollution atmosphérique. Dans l'atmosphère terrestre, l'hydrogène est présent à une concentration de 0,5 ppm (parties par million) entre le niveau du sol et 60 km d'altitude [1]. Les sources d'émissions d'hydrogène décrites par Schultz [41] sont les suivantes :

- La combustion incomplète des combustibles fossiles et de la biomasse (40 %) ;
- L'oxydation pétrochimique atmosphérique d'hydrocarbures méthaniques et non méthaniques (50 %) ;
- Les émissions des volcans, des océans et des légumineuses fixatrices d'azote (10 %).

75 % des émissions d'hydrogène sont éliminées de l'atmosphère sous forme de dépôts secs sur les sols, tandis que les 25 % d'émissions restantes sont éliminées par oxydation dans l'atmosphère [41].

Lorsqu'il est utilisé en tant que combustible, l'hydrogène ne produit pas de « fumées ». Un véhicule à pile à combustible n'émet pas de gaz d'échappement [42].

## Remerciements

Nous nous sommes référés au projet HyResponse et les documents présentés ici sont fondés sur les cours HyResponse originaux.

## Références

1. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
2. NFPA (2009). Life safety code.
3. Hammer, W (1989). Occupational Safety Management and Engineering, 4<sup>th</sup> edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, chapter 19.
4. 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.
5. 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
6. Prasher, D (2000). Noise Pollution Health Effects Reduction (NOPHER): An European Commission Concerted Action Workplan. Noise Health, Issue 2, pp. 79-84. Available from: <http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2000/2/8/79/31748> [accessed 09.11.20].
7. Hydrogen Detection in Oil Refineries. A Gassonic. A General Monitors Company.
8. NIO Note D'Information Operationnelle (2013). 'Intervention sur les installations d'hydrogène et Les risques lies. In French and in English. Available from: [http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Actualites/LA-NOTE-D-INFORMATION-OPERATIONNELLE-N.I.O.-SUR-LE-RISQUE-HYDROGENE-GENESE-INTERET/\(mode\)/full/\(page\)/14](http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Actualites/LA-NOTE-D-INFORMATION-OPERATIONNELLE-N.I.O.-SUR-LE-RISQUE-HYDROGENE-GENESE-INTERET/(mode)/full/(page)/14) Download from: [http://pnrs.ensosp.fr/content/download/32685/550103/file/ENSOSP-PNRS\\_LA%20NIO%20SUR%20LE%20RISQUE%20HYDROGENE.pdf](http://pnrs.ensosp.fr/content/download/32685/550103/file/ENSOSP-PNRS_LA%20NIO%20SUR%20LE%20RISQUE%20HYDROGENE.pdf) [accessed 25.11.20].
9. Friedrich, A. et al. (2012). Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets. International Journal of Hydrogen Energy. Vol.31, pp.17589-17598.
10. Drysdale, D (1985). An introduction to fire dynamics. John Wiley and Sons, Chichester, p. 146
11. 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.
12. DNV Technica (2001). Human resistance against thermal effects, explosion effects, toxic effects and obscuration of vision. DNV Technica, Scandpower A/S, Det Norske Veritas, Oslo, Norway.
13. BSI British Standards Institution (2004). Published Document PD 7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings - Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupants evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6).
14. BSI British Standards Institution (1997). British Standard 7899:1997. Code of practice for assessment of hazard to life and health from fire. Guidance on methods for the

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

- quantification of hazards to life and health and estimation of time to incapacitation and death in fires.
15. National Fire Protection Association NFPA, Recommended practice for Responding to Hazardous Materials Incidents (1997).
  16. Rew, P. (1997) LD50 equivalent for the effects of thermal radiation on humans, in: Suffolk, Health and Safety Executive (HSE) Books.
  17. Bull, JP (1971). Revised analysis of mortality due to burns. THE LANCET, Vol. 298, Issue 7734: pp. 1133-1134.
  18. Houf, WG and Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, pp. 136-151.
  19. LaChance, J, Tchouvelev, A and Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36 pp. 2381-2388.
  20. O'Sullivan, S and Jagger, S. (2004) Human vulnerability to thermal radiation offshore, in: S. Jagger(Ed.), Health&Safety Laboratory, Buxton.
  21. Chang, Y et al. (2008). The Study of Flame Engulfment Protection of Firefighter's Clothing, J. Hanaoka Textile, Vol. 15, 345–349.
  22. Eisenberg, NA, et al. (1975). Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills, Final Report SA/A-015 245, US Coast Guard.
  23. Tsao, CK and Perry, WW (1979). Modifications to the vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills. Report ADA 075 231 US Coast Guard.
  24. Lees, FP (1994). The assessment of major hazards: a model for fatal injury from burns. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Vol. 72 (Part B), pp. 127-134.
  25. Methods for the determination of possible damage. In: CPR 16E. The Netherlands Organization of Applied Scientific Research; 1989.
  26. NATO (1993). Field manual, health service support in a nuclear, biological, and chemical environment. Fm 8-10-7 Headquarters, Department of Army, Washington DC.
  27. Health and Safety Executive (2006). Indicative human vulnerability to the hazardous agents present offshore for application in risk assessment of major accidents. SPC/Tech/OSD/30.
  28. Okabayashi, K, Hirashima, H, Nonaka, T, Takeno, K, Chitose, K and Hashiguchi, K (2007). Introduction of Technology for Assessment on Hydrogen Safety. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review. Vol. 44(1), pp. 1-3.
  29. Lees, FP (2004). Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3<sup>rd</sup> Edition – Hazard Identification, Assessment and Control. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
  30. Scilly, NF and High, WG (1986). The blast effects of explosions. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 39-1-39-15.
  31. Baker, WE et al. (1983). Explosion hazards and evaluation. Elsevier Scientific Publishing Company.
  32. Mannan, S (2005). Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 3<sup>rd</sup> ed., vol. 1. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

## Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

33. Molkov, V and Kashkarov, S (2015). Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 40, pp. 12581–12603.
34. Stephens, MM (1970). Minimising damages to refineries from nuclear attack. Natural and other disasters. Office of oil and gas. Department of Interior.
35. Mercx, WPM, Weerheijm, J, Verhagen, TLA (1991). Some considerations on the damage criteria and safety distances for industrial explosions. 11<sup>th</sup> Symposium on New Directions in Process Safety – Hazards. 124, pp. 255-275.
36. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Available from: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [accessed on 11.11.20].
37. EU No 406/2010, Commission Regulation of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles. *Official Journal of the European Union*. Vol. 53, 18 May 2010. Available from: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [accessed on 09.11.20].
38. Esbroeck, T and Vollmacher, K (2015). ISO propulsion energy identification. Commission for Extrication and New Technologies. Unpublished.
39. (NF) EN 469:2006-02. European Standard. Protective clothing for firefighters. Performance requirements for protective clothing for firefighters.
40. (NF) EN 136: 1998. European Standard. Respiratory protective devices. Full face masks. Requirements, testing, marking.
41. Schultz, MG, Market, F, Pilegaard, K (2004). Hydrogen and environment. RisØ Energy Report, Roskilde, RisØ National Laboratory. P.58-62
42. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 09.11.20].
43. Seveso Documents. Guidance on applicability, assessment and legal documents for demonstrating compliance of industrial gases facilities with Seveso directive(s). Doc 60/15, Revision of Doc 60/04. European industrial gases association AISBL.
44. Dealing with incidents involving pipelines, FPS Home Affairs. Directorate-General for Civil Security. June 2009 – version 2.2.

**Annexe 1. Guide français sur les effets thermiques associés à la combustion de l'hydrogène [8].**

Cours 6 : Critères de danger pour les personnes et les biens

| Scenario of a pipework leak      | Tank pressure (bar) | Immediate combustion (flaming leak)                |                     |                     | Delayed combustion (fire-ball) |                   |                    |
|----------------------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|
|                                  |                     | Long duration thermal effects (kW/m <sup>2</sup> ) |                     |                     | Short-term thermal effects     |                   |                    |
|                                  |                     | 3 kW/m <sup>2</sup>                                | 5 kW/m <sup>2</sup> | 8 kW/m <sup>2</sup> | SEI <sup>14</sup>              | SEL <sup>15</sup> | SELS <sup>15</sup> |
|                                  |                     | The distances are in m                             |                     |                     | The distances are in m         |                   |                    |
| Hose from an articulated trailer | 200                 | 7.2  | 7.2                 | 7.2                 | 7                              | 6.4               | 6.4                |
| 0.1 mm                           |                     | 0.2  | 0.2                 | 0.2                 | 0.4                            | 0.4               | 0.4                |
| 0.2 mm                           |                     | 0.5  | 0.4                 | 0.4                 | 0.9                            | 0.8               | 0.8                |
| 4 mm                             |                     | 11   | 9                   | 8                   | 17.6                           | 16                | 16                 |
| 0.1 mm                           | 525                 | 0.4  | 0.3                 | 0.3                 | 0.8                            | 0.7               | 0.7                |
| 0.2 mm                           |                     | 0.7  | 0.6                 | 0.6                 | 1.5                            | 1.3               | 1.3                |
| 2.3 mm                           |                     | 9  | 7.9                 | 7                   | 17                             | 15                | 15                 |
| 4 mm                             |                     | 17   | 15                  | 13                  | 29                             | 26                | 26                 |
| 5.16 mm                          | 450                 | 22   | 19                  | 17                  | 37                             | 34                | 34                 |
| 0.1 mm                           |                     | 0.2  | 0.2                 | 0.2                 | 0.7                            | 0.6               | 0.6                |
| 0.2 mm                           |                     | 0.3  | 0.3                 | 0.3                 | 1.5                            | 1.2               | 1.2                |
| 4 mm                             |                     | 16   | 14                  | 12                  | 27                             | 24                | 24                 |
| 5.16 mm                          | 700                 | 21   | 18                  | 16                  | 35                             | 31                | 31                 |
| 0.1 mm                           |                     | 0.2  | 0.2                 | 0.2                 | 0.8                            | 0.8               | 0.8                |
| 0.2 mm                           |                     | 0.8  | 0.4                 | 0.4                 | 1.72                           | 1.5               | 1.5                |
| 2.3 mm                           |                     | 10   | 9                   | 8                   | 19                             | 18                | 18                 |
| 4 mm                             |                     | 19   | 17                  | 15                  | 33                             | 30                | 30                 |

Remarque : SEI - seuil des effets irréversibles ; SEL - seuil des effets létaux ; SELS - effet létaux important [8].

**Annexe 2. Guide français sur les effets de la surpression associés à la combustion retardée de l'hydrogène [8].**

| Scenario of a pipework leak      | Tank pressure (bar) | Length of flame (m) | Delayed combustion (fire-ball)  |          |           |            |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------|-----------|------------|
|                                  |                     |                     | Effects of over-pressure (mbar) |          |           |            |
|                                  |                     |                     | 20                              | 50 (SEI) | 140 (SEL) | 200 (SELS) |
|                                  |                     |                     | The distances are in m          |          |           |            |
| Hose from an articulated trailer | 200                 |                     | 13.1                            | 8.2      |           |            |
| 0.1 mm                           |                     | 0.2                 | 0.5                             |          |           |            |
| 0.2 mm                           |                     | 0.4                 | 1                               | 0.5      |           |            |
| 4 mm                             |                     | 7                   | 20                              | 10       | 6         | 5          |
| 0.1 mm                           | 525                 | 0.4                 | 1                               | 0.5      |           |            |
| 0.2 mm                           |                     | 0.8                 | 2                               | 1        |           |            |
| 2.3 mm                           |                     | 7                   | 18                              | 9        | 6         | 5          |
| 4 mm                             |                     | 12                  | 32                              | 16       | 9         | 8          |
| 5.16 mm                          |                     | 15                  | 42                              | 21       | 12        | 10         |
| 0.1 mm                           | 450                 | 0.3                 | 0.8                             | 0.4      |           |            |
| 0.2 mm                           |                     | 0.7                 | 1.4                             | 0.7      |           |            |
| 4 mm                             |                     | 11                  | 30                              | 15       | 9         | 7          |
| 5.16 mm                          |                     | 14                  | 38                              | 19       | 11        | 9          |
| 0.1 mm                           | 700                 | 0.5                 | 1                               | 0.5      |           |            |
| 0.2 mm                           |                     | 0.8                 | 2                               | 1        |           |            |
| 2.3 mm                           |                     | 8                   | 22                              | 11       | 6         | 5          |
| 4 mm                             |                     | 14                  | 38                              | 19       | 11        | 9          |

Remarque : SEI - seuil des effets irréversibles ; SEL - seuil des effets létaux ; SELS - effet létalement important [8].

**Annexe 3. Valeurs de référence associées au seuil des effets de surpression [8].**

| Level of overpressure | 20 mbar  | 50 mbar  | 140 mbar   | 200 mbar  | 300 mbar  |
|-----------------------|--|--|--|---|---|
| Effects on structures | Threshold for significant destruction of windows             | Threshold for slight damage to structures                                      | Threshold for serious damage to structures                         | Threshold for domino effects  | Threshold for very serious damage to structures |
| Effects on man        | Threshold for indirect effects by breakage of windows on man | Threshold for irreversible effects defined by significant danger to human life | Threshold for lethal effects defined by grave danger to human life | Threshold for lethal effects defined by very grave danger to human life |   |