



Programme européen de formation des formateurs pour les intervenants

## **Cours 11**

### **Espaces confinés**

#### **NIVEAU IV**

#### **Officier spécialiste**

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

Ce sujet est **UNIQUEMENT** disponible au NIVEAU IV

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

Pompier, commandant d'équipe, commandant d'incident et officier spécialiste.  
Veuillez consulter l'introduction du cours concernant les compétences et les attentes en matière d'apprentissage s

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



### Clause de non responsabilité

Malgré le soin apporté à la préparation de ce document, la clause de non-responsabilité suivante s'applique : les informations contenues dans ce document sont fournies telles quelles et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. L'utilisateur utilise ces informations à ses seuls risques et périls.

Le document ne reflète que le point de vue de ses auteurs. La FCH JU et l'Union européenne ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient..

### Remerciements

Le projet a reçu un financement de Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) dans le cadre de la convention de subvention n° 875089. Le JU bénéficie du soutien du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne et des pays suivants : Royaume-Uni, France, Autriche, Belgique, Espagne, Allemagne, Italie, République tchèque, Suisse, Norvège.

## Résumé

Cette conférence offre aux intervenants une vue d'ensemble de l'utilisation des technologies FC et hydrogène dans les espaces confinés, par exemple à l'intérieur des bâtiments, dans les parkings et les tunnels. Il est souligné que les informations couvertes dans les conférences précédentes sont toutes applicables et que, par conséquent, seules les recherches récentes supplémentaires sont incluses ici. Cette conférence met l'accent sur les risques spécifiques liés aux systèmes de PCH situés à l'intérieur. Il aborde les thèmes importants de la ventilation passive et forcée, des feux d'hydrogène bien ventilés et sous-ventilés, y compris les deux régimes d'auto-extinction, et des flammes externes. Cette conférence aborde également le phénomène de pic de pression, qui est spécifique à l'hydrogène.

## Mots clés

Enceinte, ventilation, phénomène de pic de pression, parkings, tunnels, feux bien ventilés, feux sous-ventilés, flamme d'auto-extinction, flamme externe.

## Table des matières

Résumé.....	4
Mots clés.....	4
<b>1. Public cible.....</b>	<b>6</b>
1.1 <b>Description du rôle: de spécialiste</b> .....	6
1.2 <b>Niveau de compétence: Spécialiste</b> .....	6
1.3 <b>Prérequis: Spécialiste</b> .....	6
2. Introduction et objectifs .....	7
3. Dangers et risques associés à l'utilisation d'hydrogène dans des enceintes.....	7
4. Fuites par perméation.....	12
5. Libérations et dispersions d'hydrogène à l'extérieur .....	12
6. Ventilation naturelle et forcée.....	14
7. Phénomène de pic de pression .....	18
8. Parkings.....	23
9. Tunnels .....	27
9.1 Effet de la vitesse de ventilation sur la dispersion dans les tunnels.....	27
9.2 Transition déflagration-détonation (DDT) dans le tunnel.....	28
10. Régimes d'incendie d'hydrogène intérieur.....	31
10.1 Incendies bien ventilés.....	31
10.2 Incendies sous ventilés .....	33
10.3 Mode de flamme à auto-extinction.....	34
10.4 Mode de flamme externe .....	38
11. Utilisation du e-Laboratory.....	41
11.1 Ventilation passive dans une enseinte avec un événement: concentration d'hydrogène uniforme.....	41
11.2 Phénomène de pic de pression pour libération non enflammée. peaking phenomenon for unignited release.....	46
11.3 Phénomène de pic de pression pour libération enflammée .....	52
Remerciements.....	58
Références .....	59

## 1. Public cible

Les informations contenues dans ce cours s'adressent au niveau de l'officier spécialisé. La description du rôle, le niveau de compétence et les attentes en matière d'apprentissage au niveau de l'officier spécialisé sont décrits ci-dessous..

### 1.1 Description de la mission: Spécialiste

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

### 1.2 Niveau de compétence: Spécialiste

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

### 1.3 Prérequis: Spécialiste

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

## 2. Introduction et objectifs

L'utilisation des technologies FCH dans des espaces confinés est associée à une probabilité plus élevée d'accumulation d'hydrogène. En raison de la croissance de ces technologies, il est possible de trouver des installations de PCH non seulement à l'extérieur, mais aussi à l'intérieur. En voici quelques exemples : les chariots élévateurs à fourche à l'intérieur des entrepôts ; les véhicules à fourche situés dans les parkings, les tunnels et les garages ; les électrolyseurs et les piles à combustible à usage domestique, etc. En cas d'incident impliquant des installations intérieures de PCH, les développements suivants sont possibles : les occupants peuvent être incapables de quitter un bâtiment/une installation ; les intervenants peuvent être incapables d'accomplir leurs tâches sans mettre leur propre vie en danger ; la démolition partielle ou complète met en danger la vie des intervenants et des membres du grand public. C'est pourquoi la question de l'utilisation sûre de l'hydrogène et des piles à combustible dans les espaces confinés revêt une grande importance pour les intervenants. Si, en cas de rejet d'hydrogène à l'extérieur, la flottabilité est un atout naturel pour la sécurité en raison de la rapidité du rejet et de la dispersion, ce n'est pas toujours le cas en cas de rejet à l'intérieur d'un bâtiment. Un rejet rapide d'hydrogène à l'intérieur peut entraîner soit une augmentation de la pression, soit son accumulation et, partant, des conséquences plus graves.

UU était l'un des partenaires du projet Hyindoor financé par l'Europe : « Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems » ([www.hyindoor.eu](http://www.hyindoor.eu)). Les principaux résultats de ce projet ont conduit à une compréhension plus approfondie des phénomènes associés aux libérations issues d'installations d'hydrogène en intérieur et ont fourni les directives sur l'usage de l'hydrogène à l'intérieur et dans des tunnels [1, 14].

À la fin de la conférence, les Personnels de secours/formateurs seront en mesure de :

- Identifier les principaux dangers de l'usage d'hydrogène à l'intérieur,
- Distinguer la ventilation passive de la ventilation forcée,
- Décrire les principaux régimes d'incendie d'hydrogène intérieur,
- Comprendre l'effet de la décharge de déflagration,
- Expliquer le phénomène de pic de pression,
- Utiliser des nomogrammes pour évaluer la possibilité d'un phénomène de pic de pression (PPP)..

## 3. Dangers et risques associés à l'utilisation d'hydrogène dans des enceintes

Il existe plusieurs scénarios impliquant des applications à PCH situées dans des enceintes (voir Deliverable D1.1 of HyResponder [2]). Le volume total des enceintes peut varier, d'un petit garage à une enceinte de type boîtier pour une pile à combustible (PC) fixe, en passant par un

## Cours 11: Espaces confinés

grand entrepôt. Les taux de libération d'hydrogène peuvent varier également, d'une libération à faible débit depuis une conduite d'alimentation vers une PC jusqu'à une libération à grande échelle depuis un stockage à haute pression, par exemple une libération du DD d'une voiture à PC stationnée dans un garage résidentiel. En cas d'incidents ou d'accidents survenant sur des systèmes de PCH situés en intérieur, les priorités des Personnels de secours sont : protéger la vie humaine, protéger les biens et l'environnement. Les critères de danger pour les êtres humains et les critères de dommage pour les structures sont examinés en détail dans la conférence concernée.

Les dangers liés à un incident/accident sur des installations à PCH d'intérieur comprennent :

- Appauvrissement en oxygène et une asphyxie consécutive,
- Effets d'une température élevée et d'un flux thermique provenant de jets enflammés,
- Brûlures cryogéniques par déversement d'hydrogène liquide,
- Effets des surpressions,
- Lésion et perte de vie,
- Effondrement structurel,
- Effets « domino, »
- Dommages à l'environnement.

Les personnes qui conçoivent/approuvent/possèdent l'installation à PCH intérieure devraient réfléchir attentivement à la réduction des « dommages aux structures et équipements d'infrastructures et à la minimisation des interruptions d'activité, à la préservation de l'image d'entreprise et à la réduction des pertes financières directes et indirectes » [3, 4]. « Il conviendrait de veiller à empêcher les effets d'accumulation des objets, des événements et des agencements sur les dommages et à évaluer l'importance des biens à l'intérieur et autour d'une installation » [3].

En cas de libération, qu'elle soit faible ou importante, il existe un certain nombre de phénomènes potentiels qui peuvent se produire. Ceux-ci comprennent les phénomènes suivants :

- Libération d'hydrogène non enflammée. Si cela se produit à l'intérieur, les questions qui doivent être prises en compte incluent : l'évaluation de la taille de l'enveloppe inflammable ; la détermination du niveau de surpression potentiel (sans inflammation) ; l'évaluation de la relation entre le taux de ventilation et la libération.
- Libération enflammée. Si la libération est enflammée avec la formation d'un jet enflammé, différentes questions doivent être prises en compte, telles que le transfert de chaleur à l'environnement, la capacité d'entretien d'un incendie (à savoir : existe-t-il une



## Cours 11: Espaces confinés

quantité suffisante d'oxygène pour l'entretenir ou va-t-il s'éteindre ?) ; la relation entre la ventilation et le comportement de l'incendie ; la possibilité que l'incendie se rallume.

- Explosion : Il conviendra ici de poser les questions suivantes : si une libération non enflammée s'accumule et s'enflamme par la suite, entraînant une déflagration ou une détonation, quelles seront les conséquences ? Quelle est la relation entre la décharge et la suppression de déflagration ?

L'hydrogène présente une forte propension à fuir et cela peut devenir un problème dans un environnement intérieur. Bien entendu, l'accumulation d'hydrogène dans des enceintes peut conduire à la formation d'un mélange inflammable avec l'air (ou l'oxygène). Il existe également d'autres questions associées à des libérations accidentelles, telles que le phénomène de pic de pression (PPP) et l'effet de l'appauvrissement en oxygène. Une ventilation adaptée peut atténuer ces effets. Si une fuite d'hydrogène est enflammée, l'incendie (jet enflammé ou panache) se propagera et se développera dans une enceinte. Outre la flamme et les dangers associés, tels que la température et le flux thermique, seront présents des produits de combustion gazeux chauds qui peuvent également représenter un danger. À mesure que ces produits gazeux augmentent, une couche de gaz chauds peut se former sous le plafond de l'enceinte. Le mode de développement de l'incendie dépendra du type de combustion, de l'interaction avec l'environnement et de l'accès à l'oxygène [5]. Suivant la taille et l'emplacement de la fuite, la flamme elle-même peut frapper des éléments de construction de l'enceinte.

Les phénomènes liés à la sécurité et les conséquences potentielles associées aux incidents/accidents en intérieur impliquant des systèmes de PCH sont résumés dans le diagramme représenté sur la Figure 1.

## Cours 11: Espaces confinés

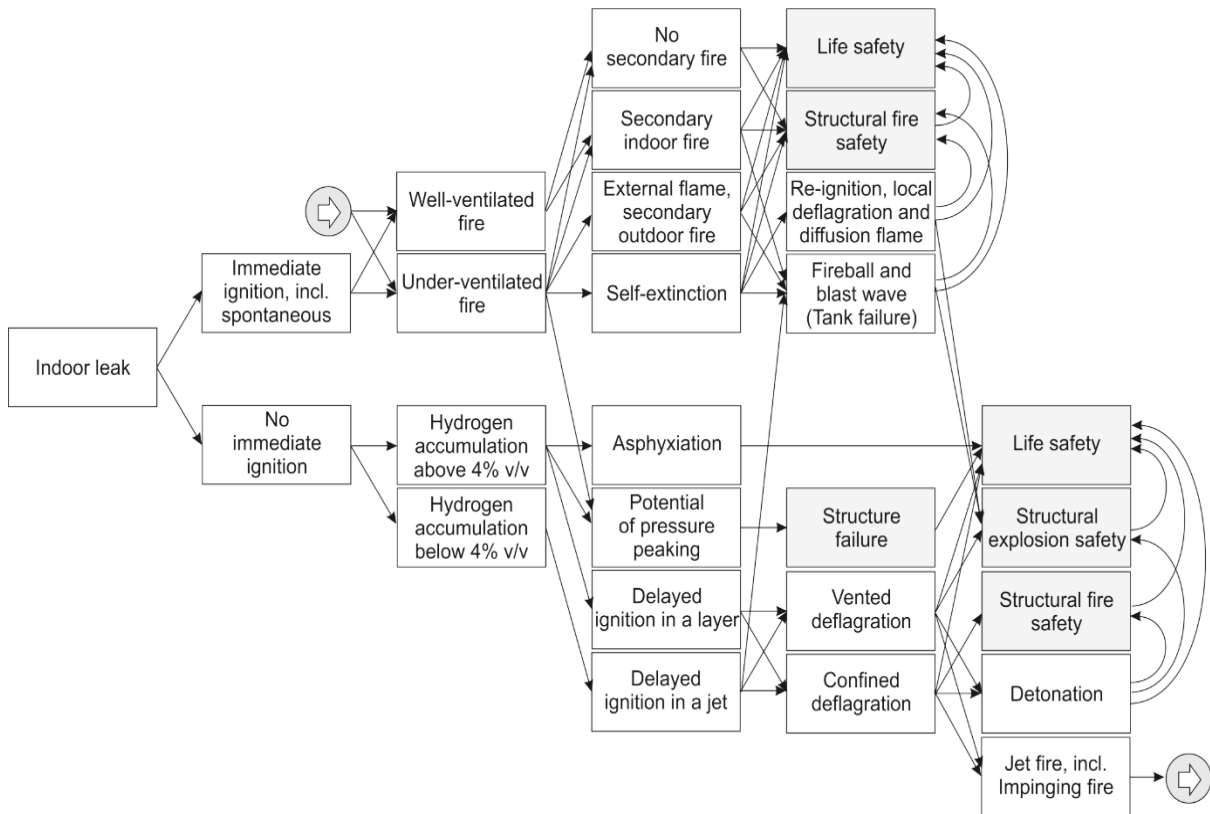


Figure 1. Phénomènes liés à la sécurité et conséquences. Les cases blanches correspondent aux phénomènes d'hydrogène ; les cases grises aux conséquences [4].

Comme illustré sur la Figure 1, après une fuite d'hydrogène dans des espaces confinés, deux options sont possibles : aucune inflammation immédiate (branche inférieure du diagramme) et inflammation immédiate comprenant une inflammation spontanée (branche supérieure du diagramme). L'inflammation d'une fuite d'hydrogène peut provoquer la présence d'un incendie, d'une surface chaude, d'une étincelle électrique ou mécanique et d'autres facteurs, ainsi que le phénomène spécifique de l'hydrogène d'*inflammation spontanée* (dans des conduites remplies d'air) par ce qu'on appelle le mécanisme de diffusion [6].

Si la fuite s'enflamme immédiatement, un incendie consécutif peut se développer selon deux modes : *bien ventilé* et *sous-ventilé*. L'*incendie bien ventilé* se caractérise par un taux de libération d'hydrogène relativement faible et une combustion complète de l'hydrogène dans l'enceinte. Les dangers associés à l'incendie bien ventilé comprennent :

- effet direct de la flamme et du courant de produits de combustion chauds,
- rayonnement depuis la couche chaude formée sous le plafond,
- surfaces solides chaudes, tels que les toits, défaillance structurelle d'éléments de construction porteurs en raison touchés directement par les flammes, etc.

Une augmentation du taux de libération d'hydrogène peut entraîner la transition vers un *incendie sous-ventilé*, lorsque l'oxygène est consommé à un taux plus rapide que sa réalimentation par la ventilation. Cela peut conduire à deux sous-régimes : *une flamme externe*

## Cours 11: Espaces confinés

survenant dans les événements (sans combustion à l'intérieur de l'enceinte) et une *auto-extinction* totale de l'incendie dans l'enceinte. Les mesures supplémentaires doivent être prises par les Personnels de secours après l'auto-extinction de l'incendie, par exemple dans un contenant à PC, pour garantir que l'hydrogène ne s'accumule pas au-dessus de la limite dangereuse dans l'enceinte abritant la PC.

Les deux types d'incendie peuvent entraîner l'inflammation de matériaux inflammables à l'intérieur de l'enceinte, générant un *incendie intérieur secondaire*. Par conséquent, l'incendie continuera à brûler même après l'arrêt de la libération d'hydrogène, par ex. en fermant les clapets de sécurité, et des dangers supplémentaires, tels que la libération de fumées toxiques, sont possibles. L'incendie sous-ventilé se caractérise par un taux de libération d'hydrogène relativement élevé. Il est donc possible qu'un PPP menace l'intégrité structurelle de l'enceinte [6, 7]. Il est intéressant de remarquer que tant les libérations non enflammées qu'enflammées peuvent générer une surpression dangereuse en raison d'un PPP. Cependant, le calcul de la surpression due à un PPP est différent pour une libération non enflammée et un jet enflammé. L'incendie sous-ventilé peut également conduire à une flamme externe, c'est-à-dire à un *incendie extérieur secondaire*.

Si les deux types d'incendie, ainsi que les incendies secondaires, ne sont pas éteints et continuent à brûler, cela peut potentiellement conduire à une défaillance catastrophique du ou des réservoirs de stockage situés à l'intérieur, entraînant une libération d'énergie rapide suivie de l'inflammation de grandes quantités d'hydrogène, produisant une *boule de feu* et une *onde de choc*. La flamme externe et des incendies extérieurs secondaires peuvent également provoquer la défaillance d'un ou plusieurs réservoirs de stockage d'hydrogène extérieurs. Des mesures doivent donc être prises pour empêcher cela, par ex. en plaçant les récipients de stockage d'hydrogène externes à une certaine distance des événements de l'enceinte.

L'incendie sous-ventilé auto-éteint peut se rallumer lorsqu'une nouvelle quantité d'air frais pénètre dans l'enceinte. Cela peut potentiellement conduire à une *déflagration localisée* et à une flamme de diffusion dans les zones contenant de l'hydrogène au-dessus de la limite inférieure d'inflammabilité (LII), à savoir 4 % en volume. Tous les types d'incendie présentent des dangers d'*atteinte à l'intégrité des personnes* (dommages thermiques directs par la flamme, dommages thermiques par rayonnement, surpression due au PPP, et toxicité des produits de combustion produits par les incendies secondaires) et des dangers de *sécurité incendie structurelle* (affaiblissement de l'intégrité structurelle et effondrement final de l'enceinte dû à des incendies prolongés) [4].

Si la fuite d'hydrogène n'est pas enflammée immédiatement lors de la libération, elle conduirait à une accumulation d'hydrogène progressive dans l'enceinte. La libération à un débit élevé dépassant la capacité de ventilation peut produire une concentration en hydrogène supérieure à la LII, ce qui crée la possibilité de l'*inflammation retardée dans une couche* et sa déflagration. De plus, une libération à débit élevé peut entraîner une asphyxie et un PPP. Bien que l'hydrogène ne soit pas vénéneux/toxique, il ne soutient pas le métabolisme. De même que pour

## Cours 11: Espaces confinés

tout autre gaz (à l'exception de l'oxygène), il existe un risque d'asphyxie, principalement dans les zones confinées, en raison de l'appauvrissement en oxygène [8]. La libération d'hydrogène à un débit plus faible, ne conduisant pas à l'accumulation d'hydrogène au-delà de 4 % en volume dans une couche, peut encore conduire à une *inflammation retardée dans un jet*. Les deux types d'inflammation retardée peuvent entraîner la déflagration d'un mélange hydrogène-air avec une surpression que peut potentiellement détruire l'enceinte. L'atténuation des explosions par décharge de déflagration est une technique répandue. Lorsque l'enceinte est pourvue d'évents, qui assurent une décompression de la surpression de déflagration, une *décharge de déflagration* peut se produire. Une *déflagration confinée* diffère de la décharge de déflagration par l'absence d'ouvertures significatives conduisant vers l'atmosphère, empêchant la décompression dans l'enceinte. Le pic de pression dans un récipient clos pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique, initialement aux TPN, peut atteindre 815 kPa [9], ce qui détruirait toute structure civile (généralement capable de supporter des surpressions d'environ 10 à 20 kPa).

Dans certains cas, la déflagration peut entraîner une transition vers la *détonation*. Du fait de la plus grande vitesse de propagation de la flamme et de niveaux plus importants de surpression, les détonations présentent des plus grands dangers comparé aux déflagrations. Tant la déflagration que la détonation représentent un danger pour *l'intégrité des personnes* en raison des effets de pression et de température. Elles représentent également un danger en termes de *sécurité structurelle liée aux explosions*, conduisant dans les pires scénarios à l'effondrement de l'enceinte. Enfin, les deux événements d'inflammation retardée examinés plus haut peuvent être associés à des jets enflammés, incluant un effet d'*impact du feu* sur les murs et/ou le plafond de l'enceinte. Une fois le jet enflammé établi, il peut brûler dans un régime bien ventilé ou sous-ventilé et les phénomènes et conséquences de sécurité consécutifs suivraient le schéma indiqué dans la branche supérieure du diagramme (Figure 1) correspondant à l'inflammation immédiate comme illustré par la flèche (⊕) dans les pictogrammes de cercle.

## 4. Fuites par perméation

La perméation d'hydrogène à travers les réservoirs de stockage n'est pas prévue comme un problème pour les personnels de secours. Cependant, par souci d'exhaustivité, les phénomènes sont décrits dans la Conférence 3 - Stockage d'hydrogène, la Conférence 4 - Compatibilité de l'hydrogène avec différents matériaux, et la Conférence 6 - Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation.

## 5. Libérations et dispersions d'hydrogène à l'extérieur

es applications de l'énergie hydrogène exigent souvent que les systèmes soient utilisés à l'intérieur, par exemple les chariots de manutention dans un entrepôt, les piles à combustible situées dans une pièce, ou l'hydrogène stocké et distribué à partir d'une armoire à gaz. Il peut également être nécessaire ou souhaitable de placer certains composants/équipements du

## Cours 11: Espaces confinés

système hydrogène dans des enceintes intérieures ou extérieures pour des raisons de sécurité ou de sûreté, afin de les isoler de l'utilisateur final et du public.

L'utilisation de l'hydrogène dans des environnements confinés nécessite des évaluations détaillées des dangers et des risques associés, y compris des dispositifs potentiels de prévention et d'atténuation des risques. Le rejet d'hydrogène peut potentiellement conduire à l'accumulation d'hydrogène et à la formation d'un mélange hydrogène-air inflammable, ce qui peut entraîner des incendies par jets d'eau.

Le projet HyIndoor a permis de combler les lacunes en matière de connaissances dans les quatre domaines principaux suivants (<https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>).

- Dégagement d'hydrogène à l'intérieur d'une enceinte confinée ou semi-confinée ;
- Déflagration hydrogène-air à l'intérieur ;
- Feu de jet et feu non ventilé ;
- Détection de l'hydrogène dans les espaces confinés.

Les connaissances générées ont été traduites en lignes directrices de sécurité de pointe, y compris des outils d'ingénierie spécifiques soutenant leur mise en œuvre. Des recommandations ont été formulées en ce qui concerne les évolutions nécessaires dans le cadre des réglementations, des codes et des normes aux niveaux européen et international pour soutenir l'introduction sûre des piles à combustible et de l'hydrogène sur les premiers marchés.

Il existe trois objectifs de sécurité génériques pour tout système de sécurité, y compris l'utilisation de systèmes à hydrogène à l'intérieur : la sécurité des personnes, la protection des biens et la protection de l'environnement. Il convient d'accorder une attention primordiale à la sécurité des personnes, c'est-à-dire des travailleurs du site, des clients et du grand public. Les objectifs de sécurité des personnes comprennent, sans s'y limiter, les éléments suivants [3] :

- Les occupants sont en mesure de quitter le bâtiment/l'installation dans un délai raisonnable, ou les conséquences pour les occupants sont faibles et acceptables ;
- Les premiers intervenants peuvent opérer dans des conditions de sécurité raisonnables ;
- L'effondrement ou les débris ne mettent pas en danger les passants, les premiers intervenants et les autres personnes susceptibles de se trouver à proximité de l'installation.

Les règles générales de sécurité, les stratégies et les recommandations pour la conception et l'utilisation de l'infrastructure hydrogène sont les suivantes :

- Déterminer s'il est vraiment nécessaire d'abriter le système hydrogène dans une pièce/enveloppe, ou s'il pourrait être déplacé à l'extérieur où une fuite accidentelle entraînerait moins probablement une accumulation d'hydrogène dans des concentrations inflammables en raison d'une meilleure ventilation ;
- Réduction du diamètre de la canalisation d'alimentation en hydrogène et de la pression opérationnelle au minimum requis pour satisfaire aux exigences technologiques en matière de débit massique. Si la réduction du diamètre de la canalisation est impossible ou indésirable, utilisation de limiteurs de débit ;

## Cours 11: Espaces confinés

- Minimisation de la pression opérationnelle de l'hydrogène dans la mesure du possible ;
- La visée de l'infrastructure d'hydrogène de manière à assurer la désintégration du jet avant qu'il n'entre en collision avec les obstacles voisins, afin d'empêcher la formation de couches avec une concentration d'hydrogène inflammable ;
- Identification et, si possible, réduction du nombre et séparation des sources d'inflammation potentielles ;
- L'utilisation de réservoirs de stockage à haute résistance au feu afin de garantir au moins un temps suffisant pour l'évacuation des personnes ;
- Minimisation de l'inventaire d'hydrogène pour empêcher la formation d'un mélange inflammable dans une enceinte confinée, même après libération et dispersion complètes de l'hydrogène, ou pour le limiter à une quantité inférieure à celle qui produirait des dommages structurels sur les équipements et les bâtiments de faible résistance en cas de déflagration ;
- Évaluation des distances de séparation déterministes avant l'évaluation quantitative des risques (EQR). Les distances de séparation déterministes peuvent être calculées pour les rejets non enflammés et pour les incendies de jets bien ventilés à l'aide de nomogrammes publiés et validés ;
- Envisager l'utilisation préférentielle des événements latéraux par rapport aux événements de toit afin d'améliorer la ventilation passive et les événements verticaux par rapport aux événements horizontaux de la même surface ;
- Envisager l'utilisation préférentielle de plusieurs événements plutôt que d'un seul pour la même surface, avec une différence de hauteur aussi grande que possible entre les emplacements des événements et des événements situés sur tous les côtés du bâtiment afin d'améliorer la ventilation assistée par le vent, quelle que soit sa direction ;
- Envisager d'exclure autant que possible les tuyaux et conduits d'aération.

Les lignes directrices et les stratégies d'atténuation de l'application de l'hydrogène à l'intérieur des bâtiments figurent dans le rapport de sortie du projet HyIndoor (<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02429488>).

## 6. Ventilation naturelle et forcée.

La ventilation peut être *naturelle/passive* ou *forcée/mécanique/active*. La ventilation naturelle est une option préférable, car elle est bon marché et fiable, elle ne dépend pas d'une source d'alimentation et est toujours opérationnelle. La ventilation naturelle est fournie à travers des événements permanents. La localisation de ces événements est importante et doit assurer le débit d'air et la dispersion du gaz inflammable maximaux. Avec l'hydrogène, une combinaison d'événements supérieurs et inférieurs est recommandée. Si cela peut être vérifié, l'ensemble de la ventilation et de l'air d'appoint requis devrait être fourni par la ventilation naturelle.

Le plan neutre (PN) est un plan horizontal où la pression à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte sont égales. En deçà du PN, l'air pénètre dans l'enceinte et au-dessus du PN, le mélange hydrogène-air plus léger sort de l'enceinte. Pour la ventilation naturelle, le PN se situe à mi-

Cours 11: Espaces confinés

hauteur des événements (Figure 2a). Dans le cas de la ventilation passive de l'enceinte avec une libération de gaz plus léger que l'air, le PN est situé au niveau ou en deçà de la mi-hauteur de l'événement pour des conditions stables, comme illustré sur la Figure 2b

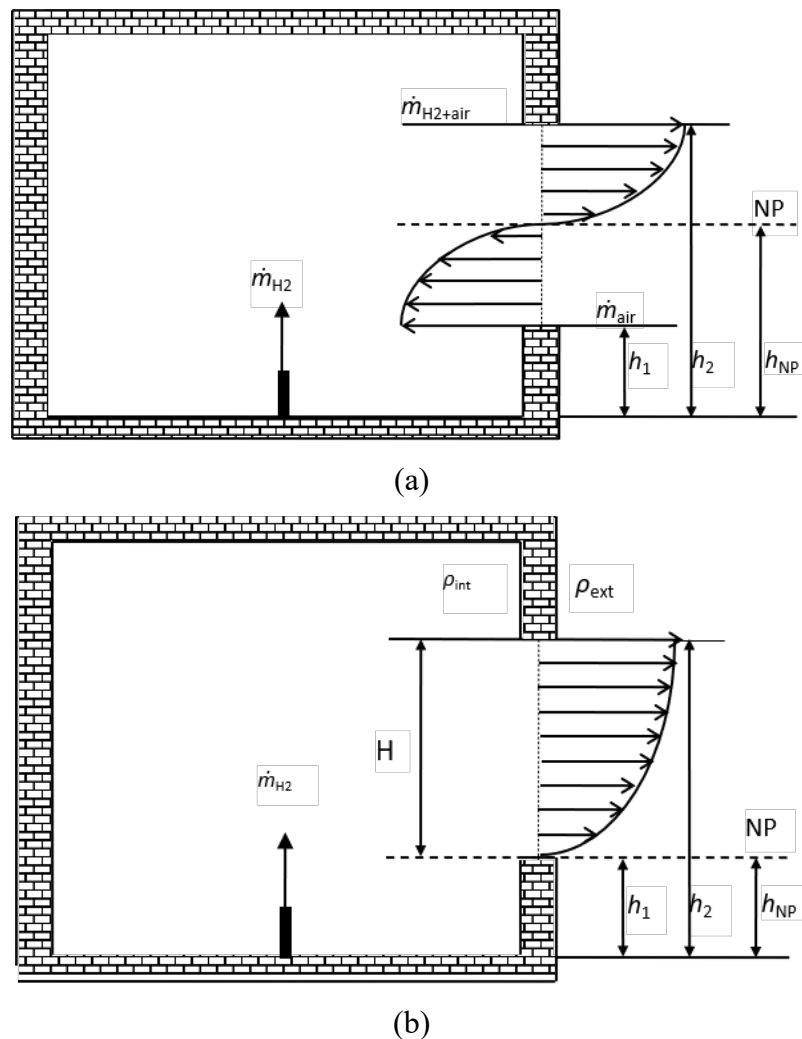


Figure 2. Vitesse d'écoulement à travers l'événement pour la ventilation naturelle (a) et passive (b)..

Les équations de ventilation naturelle pour la ventilation d'air sont calculées en supposant l'égalité d'écoulement entrant et sortant de l'enceinte. En cas de ventilation passive, le PN pour les gaz plus légers que l'air peut se situer n'importe où en deçà d'une mi-hauteur d'événement.

Le niveau de concentration maximal en hydrogène dans l'enceinte avec un événement dans la supposition de fuite continue peut être évalué à l'aide de l'équation suivante [10] :

$$X = f(X) \cdot \left[ \frac{Q_0}{C_D A (g'H)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

où  $X$  est la fraction volumique de l'hydrogène,  $Q_0$  est le taux de libération ( $m^3/s$ ),  $C_D$  est le coefficient de décharge,  $A$  est la zone de décharge ( $m^2$ ),  $H$  est la hauteur d'événement (m),  $g$  est la



## Cours 11: Espaces confinés

pesanteur réduite ( $m/s^2$ ),  $g' = g(\rho_{air} - \rho_{H_2})/\rho_{air}$ ,  $\rho_{air}$  et  $\rho_{H_2}$  sont la densité de l'air et de l'hydrogène, respectivement, ( $kg/m^3$ ) et  $f(X)$  est une fonction égale à :

$$f(X) = \left(\frac{9}{8}\right)^{1/3} \cdot \left\{ \left[ 1 - X \left( 1 - \frac{\rho_{H_2}}{\rho_{air}} \right) \right]^{1/3} + (1 - X)^{2/3} \right\} \quad (2)$$

L'équation (1) est calculée en supposant que :

- le débit de libération reste constant,
- le mélange gazeux est uniforme dans toute l'enceinte, c'est-à-dire que la concentration en hydrogène ne dépend pas de l'endroit à l'intérieur de l'enceinte.

Une comparaison avec des expériences avait toutefois montré que l'équation (1) pouvait être utilisée pour prédire la concentration maximale en hydrogène dans le cas de l'hydrogène formant des couches [10], c'est-à-dire qu'elle peut être considérée comme prudente. Sur la base des équations (1) et (2), un nomogramme technique pour le calcul des dimensions (hauteur et largeur) d'un événement dans le cas d'un mélange uniforme dans l'enceinte avec un seul événement [10] a été élaboré (Figure 3). Il faut remarquer que bien qu'en pratique le mélange hydrogène-air puisse former des couches même dans l'enceinte avec un événement, les équations et le nomogramme de la Figure 3 fourniront des résultats proches des valeurs de concentration maximale, c'est-à-dire qu'ils sont prudents et peuvent être appliqués à des mélanges non-uniformes. Le nomogramme peut être utilisé pour calculer la concentration maximale en hydrogène dans une condition stable en connaissant la hauteur et la largeur d'un événement et le taux de libération. Le nomogramme est valide à la fois pour les mélanges uniformes et non-uniformes dans une enceinte avec un événement. La procédure pour le calcul de la concentration en hydrogène (flèches rouges) se présente comme suit :

1. Sélectionner le débit massique de la fuite d'hydrogène au niveau de l'axe vertical du panneau inférieur du nomogramme et le projeter horizontalement jusqu'à l'intersection avec l'une des lignes diagonales correspondant à différentes hauteurs d'événement. Ces lignes sont au nombre de 15 dans le nomogramme de la Figure 3, couvrant pratiquement toutes les hauteurs d'événement possibles, de 0,5 m à 10 m.
2. À partir du point d'intersection, tracer une ligne verticale vers le haut jusqu'à ce qu'elle coupe l'une des lignes diagonales dans le panneau en supérieur droit du nomogramme, qui correspond à différentes largeurs d'événement. Ces lignes sont au nombre de 15 dans le nomogramme de la Figure 3, couvrant les largeurs d'événement dans la plage située entre 0,5 m et 10 m.
3. À partir du point d'intersection, tracer une ligne horizontale vers la gauche jusqu'à l'intersection avec la courbe de fonction dans le panneau supérieur gauche du nomogramme.



## Cours 11: Espaces confinés

4. Tracer une ligne verticale à partir du point d'intersection jusqu'à l'axe horizontal du panneau supérieur gauche. La valeur de l'axe horizontal correspond à la concentration en hydrogène en % en volume.

Le nomogramme de la Figure 3 peut également être utilisé pour l'évaluation opposée, à savoir pour le calcul de la taille d'évent requise pour garantir que, pour le taux de libération d'hydrogène donné, la concentration ne dépassera pas une valeur spécifiée (flèches bleues sur la Figure 3). Dans ce cas, le processus de calcul est réalisé dans l'ordre inverse, en commençant par la valeur de concentration souhaitable (voir l'exemple avec un mélange à 2 % en volume sur la Figure 3). S'il est nécessaire d'évaluer les dimensions de l'évent qui fourniront un pourcentage en volume d'hydrogène en deçà d'un certain niveau, par ex. en deçà de 2 % en volume (flèches bleues), on commencerait par la valeur en pourcentage en volume souhaitée au niveau de l'axe horizontal du panneau supérieur gauche en traçant une ligne verticale jusqu'à l'intersection avec la courbe de fonction dans ce panneau. À partir de ce point d'intersection, on peut tracer une ligne horizontale vers la droite, vers le panneau supérieur droit, en coupant les courbes de largeur d'évent. Ensuite, il faudrait sélectionner le débit massique de libération (par ex. 0,2 g/s) dans le panneau inférieur gauche du nomogramme, tracer une ligne horizontale vers la droite en traversant le panneau inférieur droit et en coupant les courbes de hauteur d'évent. Il est alors possible de déterminer les dimensions de l'évent requises pour l'enceinte afin de fournir une concentration en hydrogène ne dépassant pas 2 % en volume pour une libération d'hydrogène spécifiée. Dans l'exemple démontré sur la Figure 3, pour maintenir une concentration en hydrogène inférieure à 2 % en volume avec le taux de libération donné de 0,2 g/s, l'enceinte devrait être pourvue de l'évent de 1 m de haut et 1 m de large..

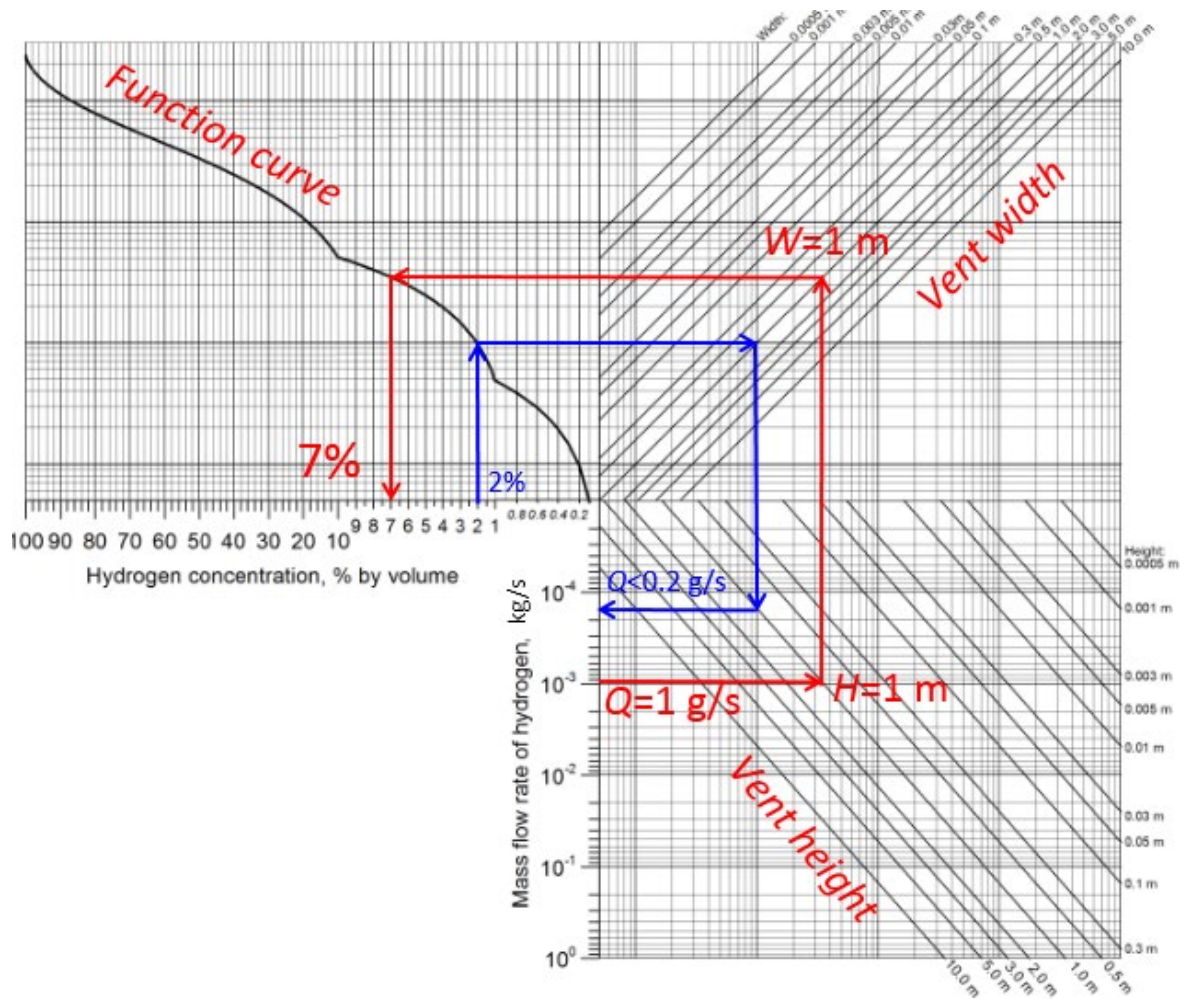


Figure 3. Nomogramme technique pour le calcul de la valeur maximale de concentration stable d'hydrogène dans l'enceinte avec un événement (coefficient de décharge  $C=0,6$ ).

## 7. Phénomène de pic de pression

Le pic de pression est le phénomène observé pour les gaz qui sont très légers (plus légers que l'air), ce qui peut entraîner une surpression dépassant la limite de résistance structurelle d'une enceinte ou d'un bâtiment dans le cas d'un taux de libération d'hydrogène suffisamment élevé. Le pic de pression se produirait si le débit de libération d'hydrogène est assez élevé pour entraîner un déplacement complet de l'air de l'enceinte, c'est-à-dire que la concentration en hydrogène dans l'enceinte doit atteindre 100 % en volume.

On sait que dans les véhicules à PC, l'hydrogène est souvent stocké sous la forme de gaz comprimé dans des réservoirs qui sont équipés de dispositifs de décompression (DD) conformes au Règlement UE No 406/2010 de la Commission [17]. Le DD est adapté sur le réservoir de combustible et commence à libérer l'hydrogène lorsque la température d'environ 110 °C est atteinte, par ex. dans des conditions d'incendie. Le DD peut assurer une libération d'hydrogène rapide si un grand diamètre d'orifice est utilisé, minimisant ainsi la possibilité d'explosion du réservoir pendant une trop longue exposition au feu. Des débits massiques

## Cours 11: Espaces confinés

élevés provenant des DD sont probablement « acceptables » à l'extérieur. Cependant, les dangers résultant d'une libération rapide à l'intérieur sont différents.

Prenons le cas d'un scénario hypothétique impliquant la libération depuis un réservoir de stockage d'hydrogène à bord classique à 35 MPa, à travers un orifice de 5,08 mm de diamètre [18]. On suppose que la libération survient verticalement vers le haut au centre, à 0,5 m au-dessus du sol, d'un petit garage de  $L \times l \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$  m [19] et de  $30,4 \text{ m}^3$  de volume avec un seul évent équivalent en superficie à une brique classique de  $L \times H = 25 \times 5$  cm située de niveau avec le plafond. Une approche prudente est adoptée, à savoir qu'un débit massique constant de  $0,39 \text{ kg/s}$  est appliqué (en ignorant une chute de pression dans le réservoir de stockage) après l'ouverture du DD. Un scénario du pire, c'est-à-dire un débit massique élevé dans un petit garage avec une décharge minimale, est donc considéré.

L'application de modèles mathématiques pour la libération subsonique à l'état stable (lorsque l'hydrogène occupe totalement l'enceinte) donne les valeurs de surpression prévues dans l'enceinte dans la plage située entre 15 (obtenu par l'équation de Bernoulli avec une vitesse nulle dans le récipient) et  $17,9 \text{ kPa}$  (d'après l'équation d'écoulement d'orifice pour un écoulement subsonique) pour un coefficient de décharge  $C$  considéré dans les deux cas comme couramment recommandé  $C=0,6$  [20]. Cependant, ces estimations ne tiennent pas compte de l'état initial d'injection d'un gaz plus léger (hydrogène) dans un gaz plus lourd (air). La charge de pression transitoire prévue dans l'enceinte ventilée est fournie sur la Figure 4.

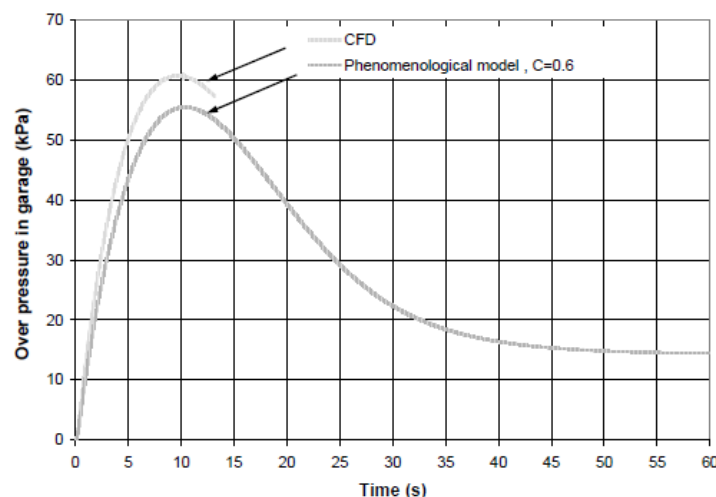


Figure 4. Surpression prévue dans le garage en fonction du temps, comparaison entre le modèle CFD et un modèle phénoménologique [18].

La Figure 4 illustre la manière dont la surpression dans l'enceinte due à l'injection d'hydrogène atteint un niveau pouvant détruire le garage [9] en seulement 3 s pour le scénario choisi. Comme il résulte de la Figure 4, si le garage n'est pas détruit en premier lieu, la pression dans le garage, pour ce scénario particulier, atteint un niveau maximal dépassant  $60 \text{ kPa}$ . La pression baisse ensuite et tend à prendre une valeur stable, considérablement inférieure, et égale à celle prédite par les estimations simples à l'état stable. Une fois encore, il convient de remarquer que

## Cours 11: Espaces confinés

cela représente un scénario du pire avec un débit massique constant. Par conséquent, la poursuite d'un débit massique constant pendant 60 s inclus sur la Figure 4 a uniquement un caractère d'exemple pour montrer l'intervalle de temps avant que des conditions stables soient atteintes lorsque pratiquement tout le garage est occupé par de l'hydrogène à 100 % en volume. Il convient également de remarquer comme la pression maximale est atteinte en moins de 10 s : pendant ce temps, tout le garage serait démoli, sans même prendre en compte les conséquences de l'inflammation.

Il faut remarquer aussi que le niveau de surpression atteint à l'intérieur du garage augmente avec la baisse du poids moléculaire du gaz injecté dans le garage, c'est-à-dire qu'un gaz plus léger comme l'hydrogène entraîne une pression significativement plus élevée qu'un gaz plus lourd comme le propane. Cela doit être pris en compte lors de la conception de DD prévus pour être utilisés avec l'hydrogène, c'est-à-dire qu'il ne faut pas supposer que la même technologie utilisée pour, par ex. le GNC, se comportera de la même manière pour l'hydrogène.

La Figure 5 démontre les valeurs de surpression prévues en fonction du temps pour différents gaz au même débit massique (0,39 kg/s) dans la même enceinte de type garage (volume de 30,4 m<sup>3</sup>, évent de 0,0125 m<sup>2</sup>). Coefficient de décharge C=0,6. La masse moléculaire de l'hydrogène, de l'hélium, du méthane et du propane est de 0,002, 0,004, 0,016 et 0,044 kg/mol, respectivement. Il apparaît clairement que le pic de surpression chute avec l'augmentation de la masse moléculaire du gaz. Plus la masse moléculaire du gaz est élevée, plus la pression maximale est proche des valeurs à l'état stable prévue à l'aide de méthodes simples. Le débit volumétrique en sortie de l'enceinte est inversement proportionnel à la racine carrée de la densité du gaz s'échappant de l'enceinte. Par conséquent, au début du processus lorsque la densité du mélange hydrogène-air est très élevée et proche de la densité de l'air, le débit volumétrique entrant constant d'hydrogène pur est essentiellement supérieur au débit volumétrique sortant du mélange hydrogène-air plus lourd et cela explique pourquoi la surpression pour un gaz entrant plus léger augmente jusqu'à un niveau plus élevé comparé à celui d'un gaz entrant plus lourd et pourquoi la dynamique de pression présente un pic caractéristique pour l'hydrogène uniquement.

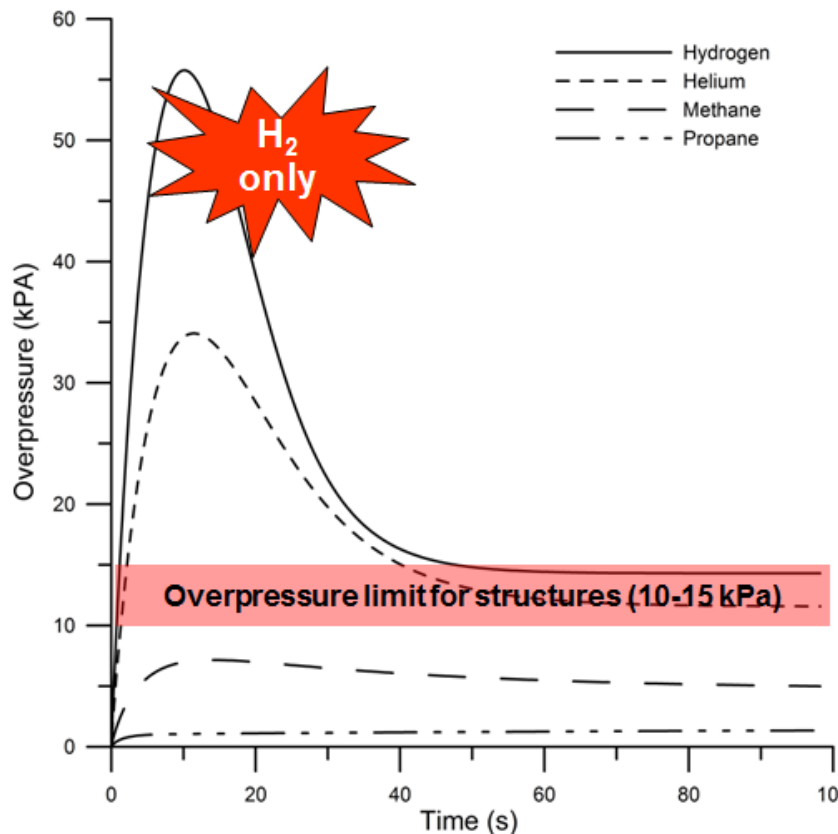


Figure 5. Valeurs de surpression prévues pour l'hydrogène, l'hélium, le méthane et le propane libéré dans un garage en fonction du temps, taux de libération de 0,39 kg/s [18].

Le phénomène de pic de pression ne survient que lorsque le taux de libération d'hydrogène est suffisamment élevé pour déplacer entièrement l'air de l'enceinte avec le temps d'une fuite contenue. Par conséquent, avant d'estimer la surpression produite par un PPP, il est nécessaire de confirmer si le taux de libération est suffisant pour remplir l'enceinte avec 100 % d'hydrogène si une fuite est continue. Un nomogramme technique sur la Figure 6 peut être utilisé pour vérifier cela [10]. Le nomogramme permet de calculer les dimensions d'évent maximales qui, pour une libération stable donnée, finiront par entraîner une concentration d'hydrogène de 100 % en volume dans l'enceinte. Afin de découvrir les dimensions d'évent maximales, il faut sélectionner le taux de libération d'hydrogène sur l'axe vertical et tracer une ligne horizontale jusqu'à son intersection avec l'une des lignes diagonales correspondant à une largeur d'évent appropriée. Tracer une ligne verticale depuis le point d'intersection jusqu'à l'axe horizontal pour trouver la hauteur d'évent requise. En variante, le nomogramme de la Figure 6 peut être utilisé pour trouver le taux de libération minimal pour une dimension d'évent connue lorsque le calcul du PPP est nécessaire, auquel cas les étapes ci-dessus sont inversées. Si le taux de libération trouvé à l'aide de ce nomogramme est inférieur au taux réel, ou si les dimensions d'évent réelles sont inférieures à celles trouvées à l'aide du nomogramme de la Figure 6, une concentration d'hydrogène de 100 % en volume sera atteinte, le PPP peut se produire et le nomogramme pour le PPP (Figure 7) devrait être utilisé.

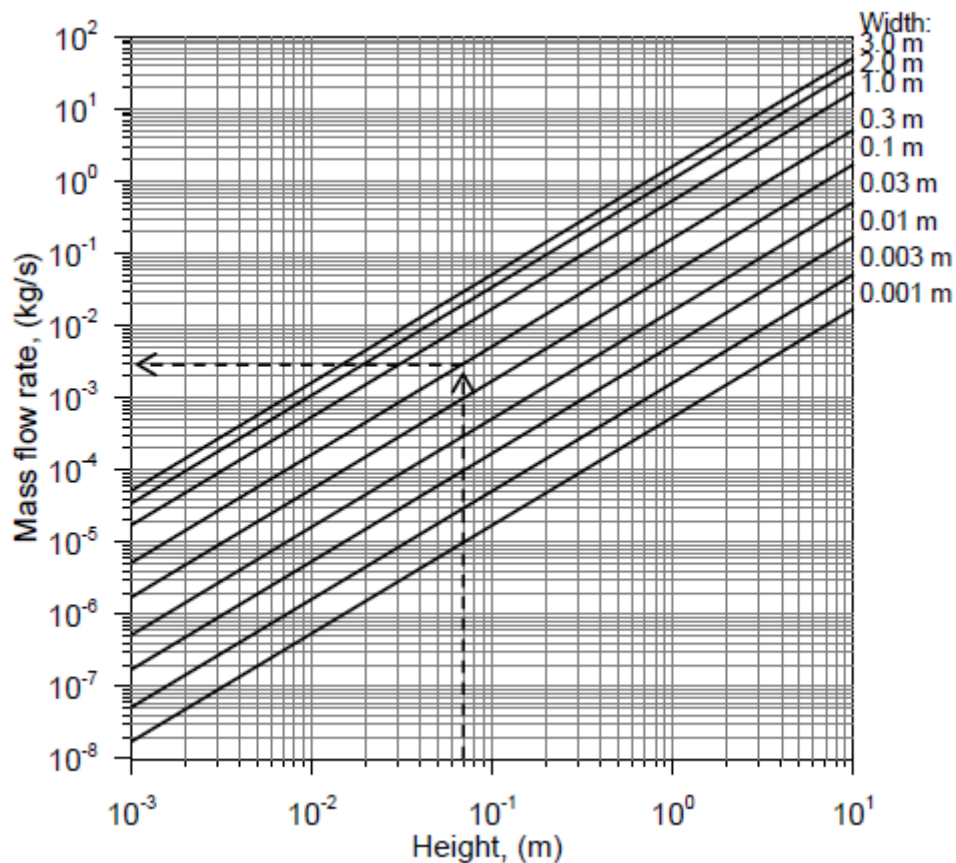


Figure 6. Nomogramme pour l'évaluation graphique du débit massique de fuite d'hydrogène dans une enceinte pourvue d'un événement qui conduit à une concentration en hydrogène de 100 % en volume [10].

La Figure 7 montre un nomogramme pour l'évaluation du PPP, qui permet le calcul du pic de pression maximal produit par une libération d'hydrogène à haut débit à partir du débit massique et du diamètre de fuite connus. Pour utiliser le nomogramme de la Figure 7, il convient de se conformer à la procédure suivante :

- Partir de l'axe vertical sur le panneau inférieur du graphique et sélectionner la pression de stockage, lire horizontalement la valeur du diamètre de fuite.
- Lire verticalement vers le haut la valeur pour calculer le débit massique de la fuite. Poursuivre verticalement vers le haut à partir du débit massique jusqu'au point d'intersection avec la ligne pour la zone de décharge appropriée dans le panneau supérieur.
- Lire horizontalement vers la gauche jusqu'à l'intersection avec l'axe vertical. Le point d'intersection fournit la surpression maximale dans l'enceinte.

En variante, le nomogramme de la Figure 7 peut être utilisé pour déterminer la superficie d'événement requise pour maintenir la surpression en deçà de la limite spécifiée. Dans ce cas, suivre les deux premières étapes, puis tracer une ligne horizontale depuis la valeur de surpression



## Cours 11: Espaces confinés

souhaitée trouvée sur l'axe vertical du panneau supérieur du graphique. La plus grande proximité avec la courbe d'intersection dans le panneau supérieur correspondra à la superficie d'évent requise (si l'intersection tombe entre deux courbes, utiliser la valeur la plus à droite pour obtenir une valeur prudente).

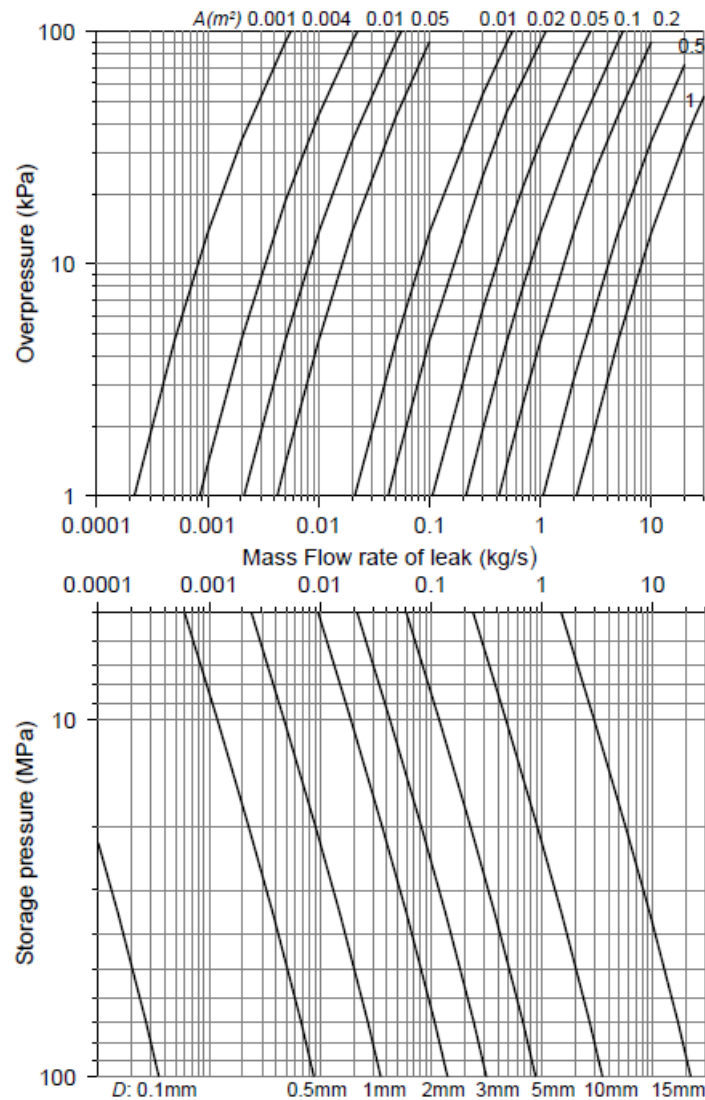


Figure 7. Nomogramme de pic de pression pour différents taux de libération [4].

## 8. Parkings

Les parkings, qu'ils soient souterrains, ouverts ou couverts, sont essentiels pour le nombre croissant de véhicules à hydrogène utilisés dans le monde. Il devient important d'examiner les scénarios pratiques et les problèmes qui peuvent survenir lors de l'utilisation quotidienne de ces véhicules. En comprenant les dangers liés au placement des véhicules à hydrogène dans des environnements confinés, des mesures peuvent être prises pour réduire les dangers et les risques associés grâce à une conception intrinsèquement plus sûre. Dans la majorité des voitures particulières, l'hydrogène est généralement stocké sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs. Les pressions de stockage typiques sont comprises entre 350 et 700 bars. Le

## Cours 11: Espaces confinés

stock d'hydrogène varie en fonction de la taille du véhicule et, selon le ministère américain de l'énergie, un stockage d'hydrogène embarqué d'environ 5 à 13 kg est nécessaire pour permettre une autonomie de plus de 300 miles pour l'ensemble de la plate-forme des véhicules automobiles légers utilisant des systèmes d'alimentation à pile à combustible [26].

Les réservoirs de stockage d'hydrogène embarqués sont généralement équipés de dispositifs de décompression (TPRD) qui assurent une libération rapide de l'hydrogène afin de minimiser le risque de défaillance catastrophique du réservoir en cas d'incendie. En cas de rejet accidentel d'hydrogène, des débits massiques élevés provenant des TPRD sont probablement acceptables à l'extérieur, où la flottabilité de l'hydrogène est un avantage pour faciliter la dispersion en dessous de la LFL. Cependant, un rejet rapide à l'intérieur pourrait favoriser son accumulation et la formation d'un mélange hydrogène-air inflammable. Du point de vue de la sécurité, un certain nombre de risques apparaissent à la suite d'un rejet à taux de masse élevé. Le phénomène de pic de pression dans un scénario de TPRD typique (diamètre de 5,08 mm) avec un petit événement a été découvert et expliqué [27]. Il a été constaté qu'un taux constant de libération d'hydrogène de 0,39 kg/s dans un garage de 30,4 m<sup>3</sup> avec un seul événement de la taille d'une brique, la surpression pouvait rapidement atteindre un niveau de 10-20 kPa en 2 s, ce qui est capable de causer des dommages importants et éventuellement un effondrement, en fonction de la nature de la structure et de la durée de l'impulsion. Ainsi, dans le cas d'un dégagement d'hydrogène, le débit volumétrique élevé de l'hydrogène entraîne des surpressions importantes, même en l'absence de combustion. Il a été démontré que la pression à l'intérieur du garage atteint un niveau maximal supérieur à 50 kPa pour un stockage de 350 bars et 100 kPa pour 700 bars. Cette pression maximale diminue ensuite et tend vers une valeur de régime permanent, inférieure d'un ordre de grandeur et égale à celle prévue par les estimations simples de régime permanent [27].

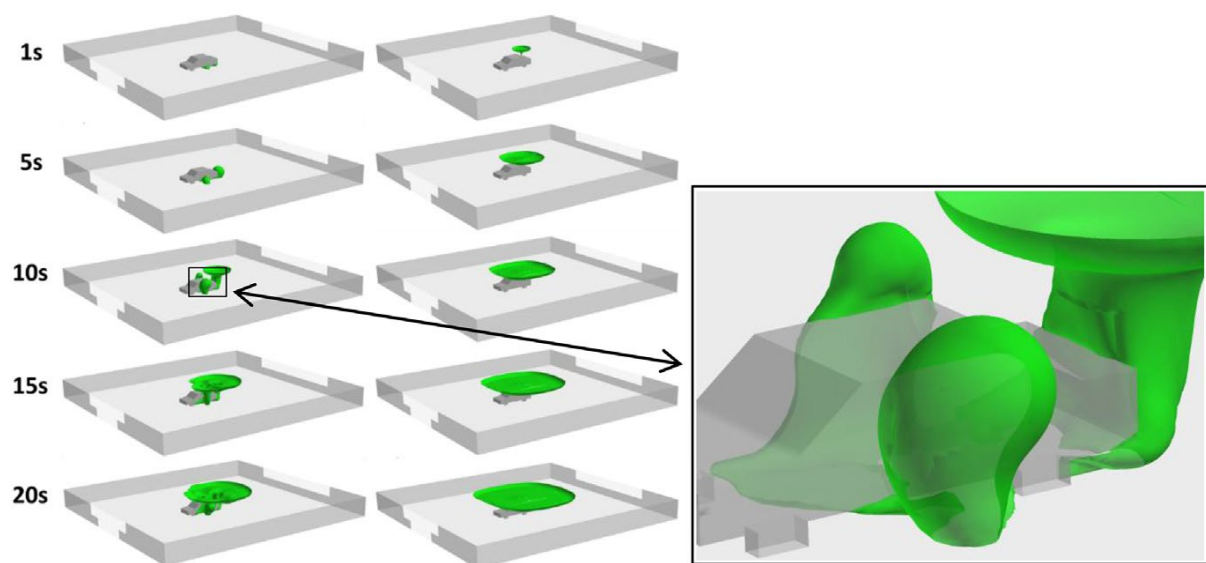
L'analyse ci-dessus indique que le diamètre "typique" du TPRD de 5,08 mm peut ne pas être "sûr" pour les enceintes, par exemple les parkings intérieurs avec une ventilation limitée. C'est pourquoi la dynamique de la pression dans les enceintes de type garage a été étudiée pour déterminer le diamètre optimal du TPRD sur la base de la théorie des jets sous-expansés et d'un modèle de soufflage à Ulster [28]. Une étude a été réalisée pour examiner la relation entre le diamètre du TPRD, les changements d'air par heure (ACH) et le volume des rejets dans les enceintes avec un seul événement à partir de réservoirs de stockage embarqués de 1, 5 et 13 kg à 350 et 700 bars. Le diamètre "sûr" a été déterminé comme étant le diamètre du TPRD qui n'entraînerait pas une surpression supérieure à 20 kPa dans un garage en cas de fuite. L'augmentation dynamique de la pression, qui est unique pour un rejet d'hydrogène dans une enceinte ventilée, doit être prise en compte lors de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène pour une utilisation à l'intérieur. L'étude de la dynamique de la pression pour un hydrogène de 5 kg stocké dans un réservoir à 350 bars dans un garage de 30 m<sup>3</sup> avec un ACH de 0,18 a indiqué que la diminution du diamètre du TPRD de 5 à 0,55 mm pouvait effectivement éviter les phénomènes de pic de pression dans le garage. Il est clair que les dispositions actuelles des



## Cours 11: Espaces confinés

TPRD, qui n'offrent pas la résistance au feu du stockage à bord, génèrent des performances inacceptables des systèmes dans les enceintes si les TPRD sont activés même en cas de rejet non enflammé. Ainsi, la "reconception" simplifiée des TPRD pour protéger la structure du garage de l'effondrement pose des exigences difficilement réalisables en matière de résistance au feu pouvant aller jusqu'à plusieurs heures. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour développer des stratégies de sécurité et des solutions techniques afin de résoudre le problème de la résistance au feu des réservoirs de stockage embarqués et des exigences en matière de performance des TPRD.

Récemment, les rejets d'hydrogène non enflammé provenant du stockage des véhicules à bord dans un parking couvert et naturellement ventilé ont été étudiés dans UU [29]. Cette nouvelle étude présente des résultats pertinents pour les constructeurs automobiles, les organismes de normalisation et l'environnement bâti au sens large. Le modèle numérique développé a été validé par rapport aux données expérimentales du KIT (Allemagne) sur le jet d'hélium, et une bonne concordance numérique et expérimentale a été obtenue dans une marge d'erreur technique acceptable. Les simulations ont été réalisées pour un parking de  $30 \times 28,6 \times 2,6$  m<sup>3</sup> conformément à la norme britannique BS 7346-7:2013. Onze cas de rejet à partir d'un stockage de 700 bars ont été envisagés, dont quatre rejets vers le haut à partir d'un tuyau situé à 0,5 m au-dessus du sol, ainsi qu'un rejet vers le haut et six rejets vers le bas. Comme prévu, un rejet à débit constant a entraîné une plus grande quantité de gaz inflammable dans le parking qu'un rejet par purge à travers le même diamètre de TPRD. Le plus petit diamètre de 0,5 m a produit une quantité de gaz inflammable considérablement plus petite que celle produite par des TPRD de plus grand diamètre, par exemple 2 et 3,34 mm. Pour les diamètres de TPRD "typiques" dans les scénarios d'enceinte, le pic de pression n'est pas préoccupant lorsque la ventilation est suffisante.



## Cours 11: Espaces confinés

Figure 8: Iso-surface montrant 1 % de fraction molaire d'hydrogène pour une libération à partir de 700 bar à travers un diamètre TPRD de 0,5 mm pour une libération vers le bas (à gauche) et une libération vers le haut (à droite) [29].

Comme l'une des nouveautés de ce travail, les rejets vers le bas et vers le haut à partir d'un stockage à 700 bars à travers un TPRD de 0,5 mm ont été comparés. Comme le montre la figure 8, il a été constaté que le rejet vers le bas entraînait une plus grande enveloppe inflammable à proximité de la voiture. Cependant, la concentration moyenne d'hydrogène dans la boîte inflammable était inférieure à celle du cas de rejet vers le haut. En revanche, la libération vers le haut a conduit à une grande enveloppe inflammable sous le plafond, mais n'entourant pas la voiture. Les rejets vers le bas et vers le haut à partir de 700 bars à travers un diamètre de 0,5 mm dans un parking couvert peuvent être considérés comme un choix plus sûr, lorsqu'ils sont associés à une conception de réservoir appropriée, produisant un risque inflammable limité qui se disperse rapidement. En particulier, trois angles de libération différents vers le bas (0°, 30° et 45°) ont été comparés pour comprendre les effets de l'orientation de la libération d'hydrogène. Comme le montre la figure 9, la libération directe vers le bas a produit une hydrogène inflammable pourrait autour de la voiture, quoique brièvement, mais cela peut présenter des défis pour les premiers intervenants pour accéder aux occupants du véhicule en cas d'allumage. Des rejets vers le bas à des angles de 30 ° et 45 ° vers l'arrière de la voiture ont éloigné le gaz inflammable de l'environnement de la voiture, ce qui a rendu plus sûre la possibilité de s'échapper. Ces facteurs doivent être pris en compte dans la conception des TPRD pour le stockage à bord des véhicules à hydrogène.

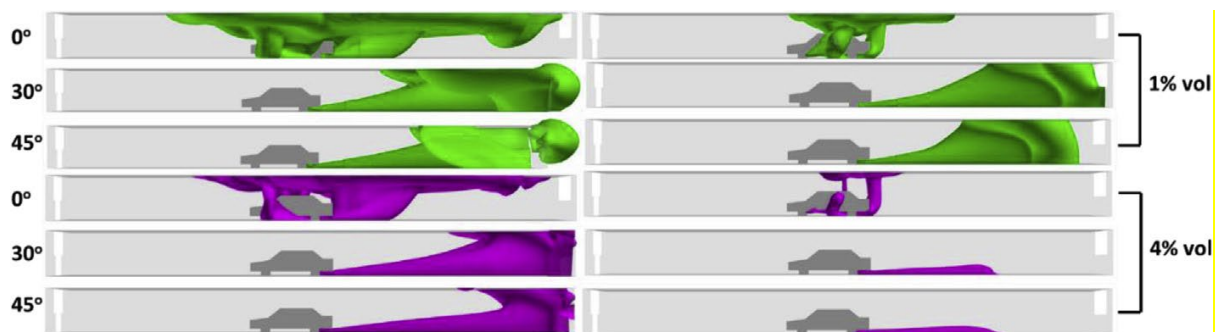


Figure 9 Parcelles iso-surface de 1 % et 4 % vol de fraction molaire d'hydrogène pour 2 mm de diamètre TPRD (à gauche) par rapport à 0,5 mm de diamètre (à droite) pour différentes directions de libération à 20 s de temps d'écoulement.

D'autres analyses des dangers et des risques associés relatifs à l'utilisation des véhicules FCH dans les systèmes de transport souterrain pourraient être trouvées dans le projet HyTunnel-CS (<https://hytunnel.net/>), notamment le Livrable D3.1 – Programme de recherche détaillé sur les sapins à hydrogène en structures confinées ([https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS\\_D3.1\\_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf)).

## 9. Tunnels

L'utilisation d'un véhicule FCH ou le transport d'hydrogène gazeux comprimé (CGH2) et d'hydrogène liquide cryogénique (LH2) dans des tunnels et des espaces confinés similaires crée de nouveaux défis pour la sécurité des personnes, la protection des biens et de l'environnement à un niveau de risque acceptable. Plusieurs études ont montré que le confinement ou l'encombrement peuvent favoriser des conséquences plus graves par rapport aux accidents en pleine atmosphère. Une analyse critique des dangers et des risques associés liés à l'utilisation des véhicules FCH dans les systèmes de transport souterrain a été réalisée dans le cadre du projet HyTunnel-CS ([https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS\\_D1.2\\_Risks-and-Hazards.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf)).

Des connaissances fondamentales pertinentes sur la libération d'hydrogène, le feu et l'explosion ont été données précédemment, par ex. la ventilation (Section 5 de ce cours), les phénomènes de pointe de pression (Section 6 de ce cours), le dégagement de jets d'hydrogène (Leçon 9 – Séparation des flammes d'hydrogène et lutte contre l'incendie) et l'explosion d'hydrogène (Leçon 10 – Faire face aux explosions d'hydrogène). Il existe peu d'autres caractéristiques uniques pour le cas des tunnels qui doivent être discutées séparément.

### 9.1 Effet de la vitesse de ventilation sur la dispersion dans les tunnels

La ventilation passive est généralement présente dans un tunnel en raison de l'effet de piston initié par les véhicules en mouvement ou des conditions météorologiques, par ex. différence de pression à travers les portails. La ventilation active est également très susceptible d'exister, notamment dans les longs tunnels, afin d'évacuer les polluants des émissions des véhicules ou les fumées en cas d'incendie.

La ventilation influence fortement la dispersion des gaz dangereux. L'emplacement exact des véhicules et la géométrie du tunnel peuvent être importants car ils affectent le champ d'écoulement généré. La ventilation peut avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur la dispersion de l'hydrogène.

Les aspects positifs sont :

- • il peut diluer les concentrations d'hydrogène en minimisant la taille du nuage inflammable ;
- • il peut transporter en toute sécurité une quantité illimitée d'hydrogène hors du tunnel par ses portails et ses puits si la concentration d'hydrogène est inférieure à la LIE.
- Les aspects négatifs sont :
- • un inflammable pourrait être étendu plus loin du rejet;
- • les turbulences peuvent être induites par la ventilation qui peut favoriser le taux de combustion donc des surpressions en cas d'allumage

En ventilation longitudinale, une vitesse d'air minimale est nécessaire pour évacuer les gaz et fumées dangereux. L'hydrogène se comporte de la même manière que la fumée d'un incendie

## Cours 11: Espaces confinés

en raison de sa grande flottabilité. Pour les incendies dans les tunnels, la vitesse critique en fonction du taux de dégagement de chaleur a été étudiée et la valeur de la vitesse de ventilation de 3,5 m/s semble être suffisante pour la plupart des incendies dans les tunnels pour empêcher l'effet de « couche arrière », y compris les grands incendies de plus de plus de 100 MW ([https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS\\_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf)).

La ventilation dans un tunnel a généralement un effet bénéfique sur la dilution de l'hydrogène et l'élimination en toute sécurité de l'hydrogène, ce qui rend les zones où la concentration d'hydrogène est inférieure à 4 % vol (LFL). Cependant, dans certaines conditions, la ventilation peut transporter et étendre davantage le nuage inflammable, entraînant le mouvement du nuage inflammable vers d'autres véhicules ou le long des conduits et des gaines de ventilation. En conséquence, d'autres études expérimentales doivent être menées pour étudier la vitesse de ventilation optimale dans ce scénario et créer la base de recommandations universelles plus générales sur l'efficacité de la ventilation dans les tunnels. De plus, l'effet d'une pente de tunnel sur le flux et la dispersion de l'hydrogène doit être inclus dans les recherches futures. La pente maximale autorisée par la directive européenne 2004/54/CE est de 5 % pour les tunnels longitudinaux neufs. En outre, la directive stipule que pour les pentes supérieures à 3 %, des mesures supplémentaires sont nécessaires pour augmenter le niveau de sécurité.

### 9.2 Transition déflagration-détonation (DDT) dans le tunnel

Le phénomène DDT a été discuté en détail dans la leçon 10, dans laquelle les critères DDT ont été principalement développés pour une géométrie fermée avec une concentration uniforme d'hydrogène dans le comburant (air ou oxygène). Cependant, en raison d'une fuite d'hydrogène ou d'un dégagement accidentel d'hydrogène d'un réservoir à haute pression dans un tunnel, un liquide non uniforme, par ex. un mélange hydrogène-air stratifié peut être formé de préférence au niveau du plafond d'une structure de tunnel.

Plusieurs expériences et simulations numériques ont été réalisées concernant la combustion et la détonation dans une couche stratifiée semi-confinée de mélange hydrogène-air typique d'un scénario d'accident dans une géométrie de tunnel. Des expériences de combustion d'hydrogène en couche mince semi-confinée ont été réalisées à l'intérieur de l'enceinte de sécurité d'un volume de 100 m<sup>3</sup> [22]. Le volume du cylindre a un diamètre interne de 3,5 m et une longueur de 12 m. Une épaisseur de paroi de 80 mm permet de réaliser des expériences de détonation directement à l'intérieur du volume. Une boîte rectangulaire de dimension 9 × 3 × 0.6 m<sup>3</sup> a été installé à l'intérieur de la cuve de sécurité, comme le montre la figure 10. En ce qui concerne la géométrie et les dimensions, une telle disposition expérimentale est très appropriée pour simuler expérimentalement un accident d'hydrogène dans un environnement de tunnel.

## Cours 11: Espaces confinés

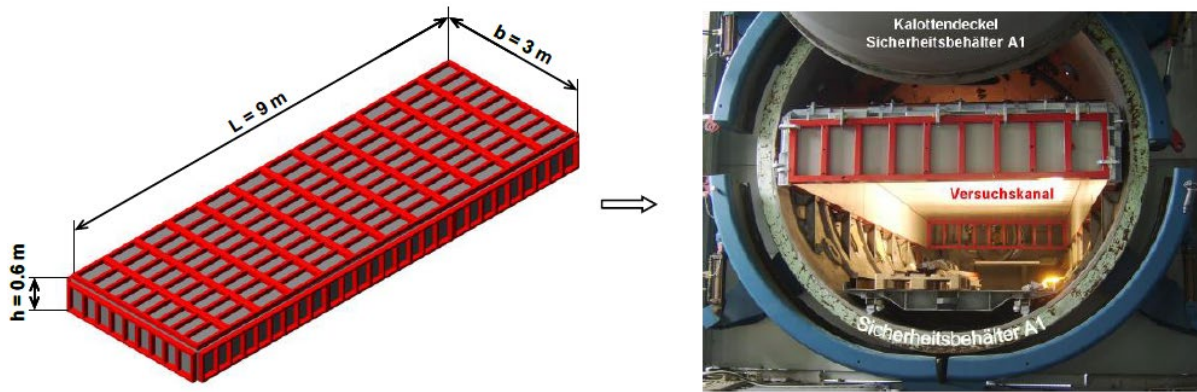


Figure 10 Dimensions principales de la boîte à couche plate (à gauche) et de la boîte à couche mince installée à l'intérieur de la cuve de sécurité (à droite) [22].

Les données expérimentales sur la pression caractéristique et les vitesses de flamme pour des compositions uniformes ont indiqué que le seuil entre les régimes de flamme lente et rapide dans les canaux semi-ouverts est la vitesse sonique dans le réactif, alors qu'il s'agit de la vitesse sonique des produits dans les canaux fermés [23]. La concentration en hydrogène la plus élevée ou le mélange le plus réactif doit être pour atteindre la vitesse du son lorsque la couche la plus fine (épaisseur  $h$ ) est appliquée. Le taux d'expansion est un indicateur critique du potentiel d'accélération de la flamme [23, 24]. La figure 11 résume les données expérimentales du taux d'expansion  $\sigma$  en fonction de la surface d'évent sans dimension (définie comme le rapport de l'épaisseur de couche  $h$  et de l'espacement entre les obstacles pour la couche semi-confinée  $s$ ). Une corrélation linéaire entre le taux d'expansion critique  $\sigma^*$  pour une propagation rapide de la flamme dans une couche plane et l'épaisseur de couche réciproque  $1/h$  ou l'espacement entre les obstacles  $s$  a été dérivé. Pour les mélanges uniformes, la détonation se produit à différentes concentrations d'hydrogène en fonction de l'épaisseur de la couche, e.g. 27% for  $h = 0.15\text{ m}$ , 23% pour  $h = 0.3\text{ m}$  et 21% pour  $h = 0.6\text{ m}$ . Les résultats suggèrent que la couche plus mince a besoin de plus de mélange réactif pour exploser que la couche plus épaisse. Étant donné que les pertes d'énergie et la réactivité du mélange sont réciproquement corrélées avec l'épaisseur de la couche  $h$  et la largeur de la cellule de détonation  $\lambda$ , on peut s'attendre à ce que le rapport sans dimension de l'épaisseur de la couche sur la largeur de la cellule de détonation soit une constante pour les conditions de détonation critiques.

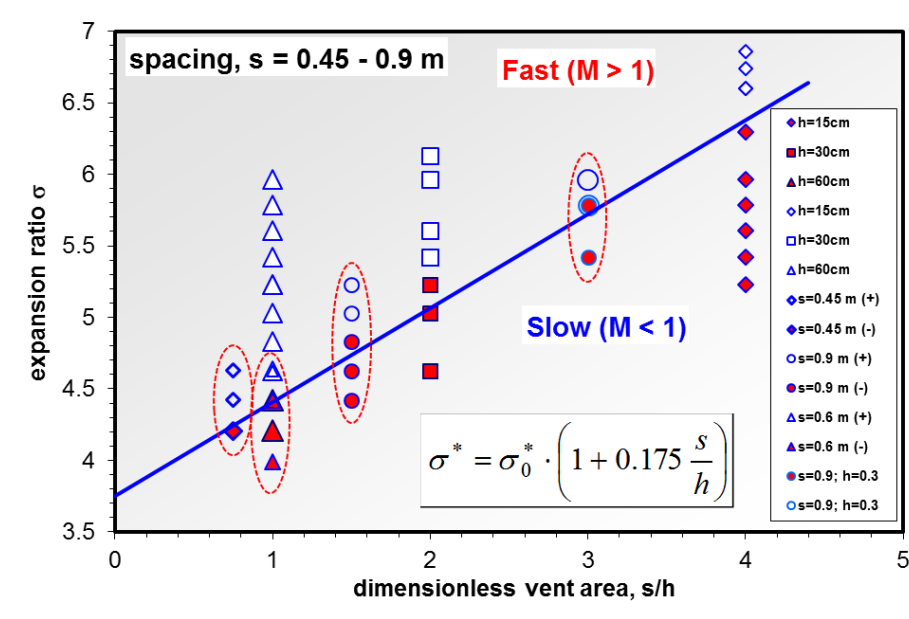


Figure 11 Conditions critiques pour une accélération efficace de la flamme en fonction du taux d'expansion par rapport à la surface d'évent sans dimension: flamme sonique et détonations (points ouverts), flamme subsonique (points pleins) [22].

La figure 12 confirme que l'épaisseur de couche sans dimension pour les conditions critiques d'apparition de la détonation est presque la même,  $h/\lambda = 13-14$ , pour trois épaisseurs de couche étudiées de 15 à 60 mm [22]. Cette valeur concorde bien avec les expériences précédentes réalisées sur une installation à plus petite échelle  $h/\lambda = 7-15$  [23].

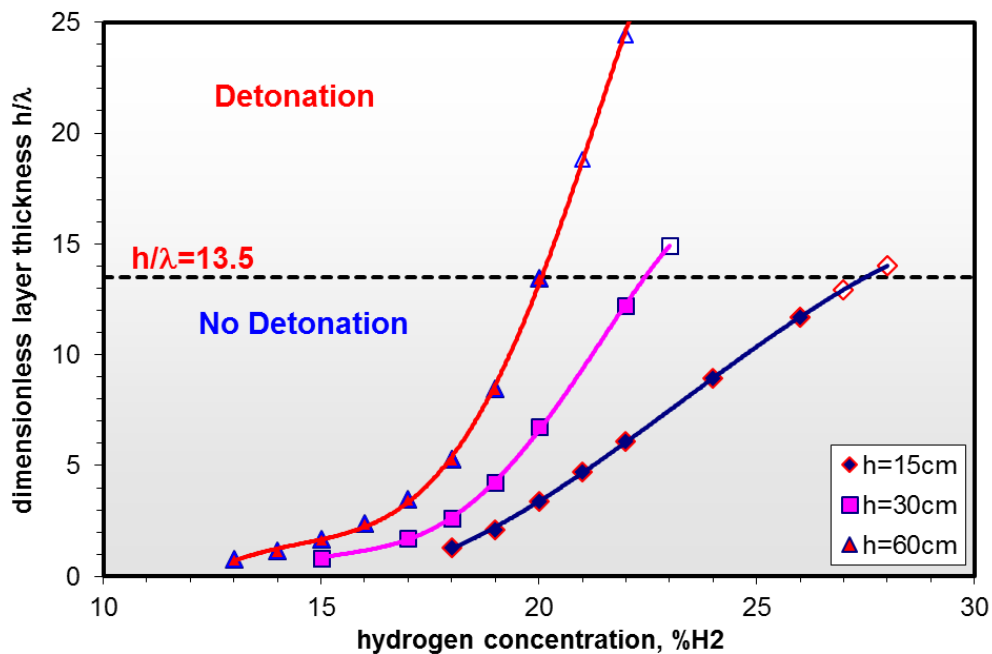


Figure 12 Conditions critiques pour le DDT dans la relation entre l'épaisseur de la couche sans dimension et la concentration en hydrogène : détonation (points ouverts) ; pas de détonation (points pleins) [22].



## 10. Régimes d'incendie d'hydrogène intérieur

Le thème des incendies d'hydrogène a été examiné précédemment dans la conférence concernée. En cas d'incendie d'hydrogène intérieur, si l'incendie est suffisamment court et s'il n'attaque pas un mur ou toute autre surface, le monogramme présenté dans la conférence précédente s'applique pour prédire la longueur de flamme. Les travaux décrits dans la « Conférence 10 – Gérer les explosions d'hydrogène » sur les effets des parois et barrières est également pertinente concernant les jets enflammés frappant directement des obstacles dans l'enceinte. Une libération d'hydrogène dans l'enceinte survient souvent à proximité ou le long d'un mur ou d'une surface, ce qui augmente la longueur de la flamme-jet ou l'étendue du jet enflammé, en réduisant l'entraînement de l'air. Les distances de sécurité peuvent donc augmenter. Cela est important lorsqu'on envisage la position des équipements et du stockage de l'hydrogène (en particulier l'emplacement des DD sur un quelconque stockage) par rapport aux murs et au sol. Le comportement de l'incendie dépend également des conditions de libération et de la géométrie de l'enceinte, et de la ventilation. Les incendies d'hydrogène intérieurs peuvent être bien ventilés et sous-ventilés.

### 10.1 Incendies bien ventilés

Si l'enceinte est équipée de la ventilation, l'oxygène nécessaire pour entretenir la combustion d'hydrogène pénétrera dans l'enceinte par les événements. Lorsque la ventilation est suffisante dans l'enceinte, la flamme sera contrôlée par le combustible et peut être considérée comme étant bien ventilée [11].

La règle générale pour un incendie intérieur avec un événement supérieur se présente comme suit : l'augmentation du débit de libération d'hydrogène modifie le régime d'incendie de :

- incendie bien ventilé (pour les débits faibles) à
- incendie sous-ventilé avec flamme externe (pour les débits modérés) à
- incendie sous-ventilé avec auto-extinction de la combustion (pour les débits plus élevés) et à nouveau à
- incendie sous-ventilé avec flamme externe (pour les débits très élevés).

Une étude numérique a été réalisée avec l'utilisation d'un modèle moderne pour comprendre les phénomènes physiques sous-jacents de l'incendie d'hydrogène intérieur. Le modèle CFD utilisé a été décrit en [12, 13]. Sept expériences numériques avec un seul événement ont été réalisées pour une enceinte de type PC aux dimensions  $L \times l \times H = 1 \times 1 \times 1$  m et avec l'événement situé de manière centrale au sommet d'un mur (Tableau 1). La libération a été dirigée verticalement vers le haut. Le tuyau de libération d'hydrogène était de 10 cm de long pour un diamètre interne de 5,08 mm et était situé au centre du sol de l'enceinte, à 10 cm au-dessus du sol. L'épaisseur des murs d'aluminium de l'enceinte était de 2 cm. D'autres détails sur les domaines de calcul peuvent être consultés en [13].

Tableau 1. Détails des expériences numériques [13].

No.	Taille d'évent, Hxl	Vitesse, m/s	Débit, g/s	Résultat
1	Horizontal 3×30 cm	600 m/s	1,0857	<b>Auto-extinction</b>
2	Horizontal 3×30 cm	300 m/s	0,5486	<b>Auto-extinction</b>
3	Horizontal 3×30 cm	150 m/s	0,2714	<b>Flamme externe</b>
4	Vertical 30×3 cm	600 m/s	1,0857	<b>Flamme externe</b>
5	Vertical 30×3 cm	60 m/s	0,1086	<b>Bien ventilé</b>
6	Vertical 13,9×3 cm	600 m/s	1,0857	<b>Auto-extinction</b>
7	Vertical 13,9×3 cm	300 m/s	0,5486	<b>Flamme externe</b>

La Figure 13 montre la dynamique du jet enflammé d'hydrogène bien ventilé dans l'expérience numérique No. 5 à la plus faible vitesse de libération, 60 m/s. L'évent vertical est situé au niveau du mur de gauche. À la fin de l'expérience numérique, l'incendie se trouvait dans des conditions quasiment stables. La zone de réaction, qui est associée à la présence de radicaux hydroxyle OH, augmente légèrement pendant la période de 10 s à 65 s (Figure 13a). La quantité d'hydrogène quittant l'enceinte est quasiment nulle (Figure 13b). La fraction molaire d'hydrogène dans l'évent est négligeable, de l'ordre de  $2 \times 10^{-4}$ . Cela indique que l'incendie est bien ventilé dans les conditions de simulation No. 5.

La Figure 13c démontre un très faible appauvrissement de la couche d'oxygène initiale au fond de l'enceinte qui peut être expliqué par le fait qu'une admission d'oxygène depuis l'extérieur par la partie inférieure de l'évent entretient la flamme (l'admission d'air est clairement observée sur les captures d'écran). Les contours de température (Figure 8d) confirment la présence de la couche au fond de l'enceinte, où la température initiale est préservée. Dans une enceinte telle qu'une pièce, cela créerait les conditions favorables à l'évacuation des occupants. Il convient de remarquer que ce modèle ne tient pas compte du rayonnement qui pourrait affecter l'acceptabilité d'une conception technique de sécurité fondée sur les critères de danger du flux de rayonnement thermique. La température baisse de 2300 K dans la flamme à environ 750-1000 K dans le courant chaud sous le plafond. Cette température est probablement insuffisante pour enflammer de quelconques matières combustibles, en particulier en présence de vapeur d'eau (la fraction molaire de H<sub>2</sub>O sous le plafond se situe dans la plage de 0,11-0,13 à 65 s). Cependant, certains composants dans le boîtier de PC pourraient être détruits. La seule différence de l'expérience numérique No. 4 est une augmentation de dix fois du taux de libération d'hydrogène. L'incendie bien ventilé est observé pour une vitesse de libération d'hydrogène de 60 m/s et un incendie sous-ventilé avec transition à la flamme externe est observé pour une vitesse de libération de 600 m/s.



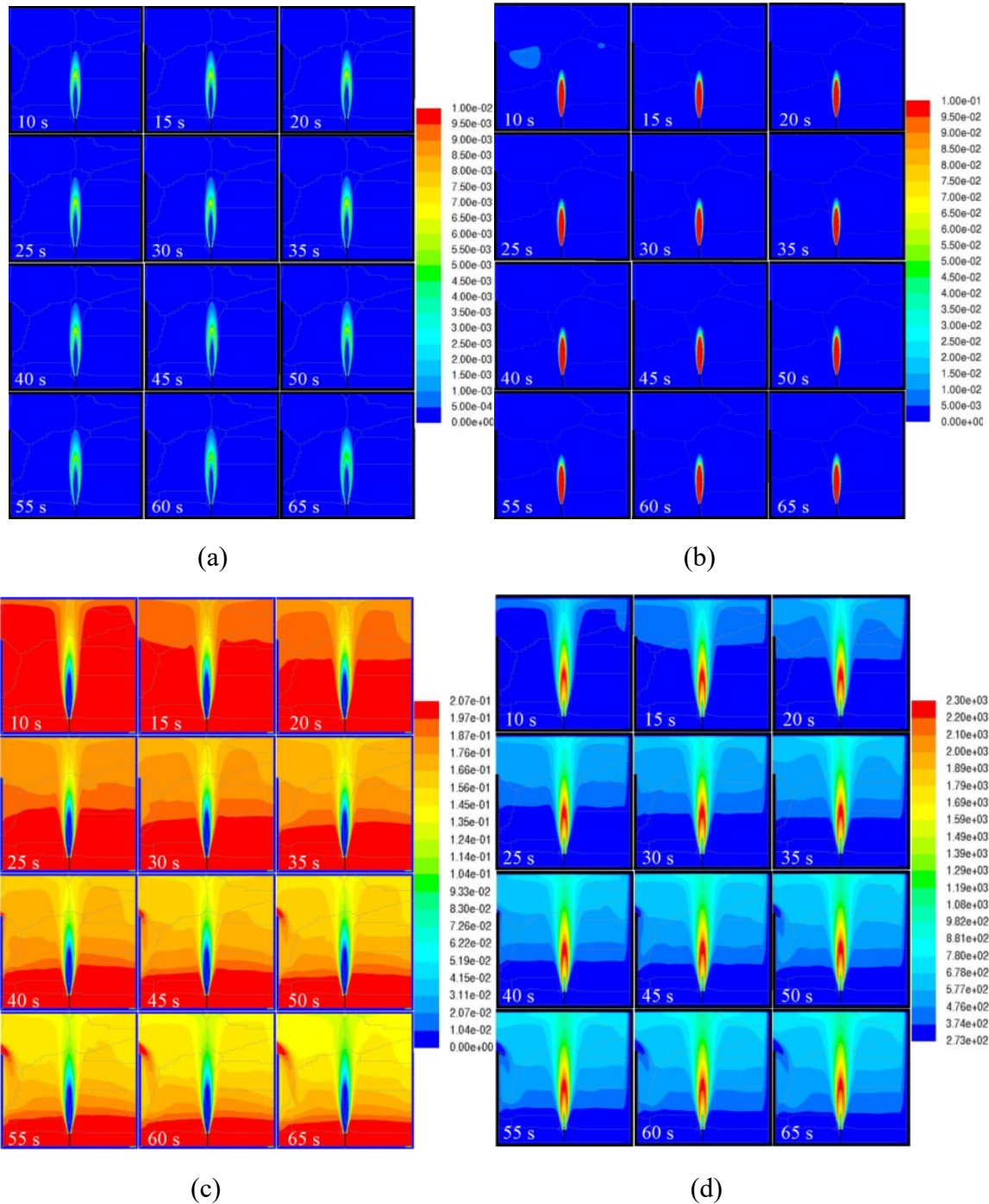


Figure 13. Coupe 2D selon l'axe médian de l'enceinte, simulation No. 5 (incendie bien ventilé) [13] : (a) fraction molaire de radicaux OH, (b) fraction molaire de H<sub>2</sub>, (c) fraction molaire d'O<sub>2</sub>, et (d) température.

### 10.2 Incendies sous ventilés

Dans le cas où la ventilation est insuffisante, la flamme sera contrôlée par la ventilation et pourrait être considérée comme étant *sous-ventilée*. Dans le cas où la flamme est sous-ventilée, tout l'hydrogène ne sera pas consommé à proximité de la fuite et ne brûlera que là où l'oxygène

## Cours 11: Espaces confinés

est disponible, par conséquent des produits chauds et potentiellement de l'hydrogène ou une flamme externe seront simultanément présents au niveau de l'événement [14].

Le développement d'une couche chaude au niveau du plafond dépend de la dimension et de la localisation des événements (le cas échéant) par rapport à la taille de la fuite. En cas de ventilation insuffisante par rapport à la fuite, la couche chaude se développera vers le bas à travers l'enceinte. Cela présente des dangers à la fois thermiques et d'asphyxie.

À mesure que la flamme devient de plus en plus sous-ventilée, le niveau d'oxygène est réduit dans l'enceinte jusqu'au moment où l'oxygène et donc la combustion sont présents à proximité de l'événement produisant une flamme externe. Il pourrait y avoir peu, voire pas de combustion dans le reste de l'enceinte, où l'hydrogène s'accumulera. Dans ce cas, si la fuite était ensuite stoppée (coupée) ou réduite par une purge, puis alors la flamme externe pourrait retourner dans l'enceinte où une atmosphère inflammable prémélangée pourrait potentiellement exister, conduisant à une explosion [14].

Si l'enceinte ne possède aucune ventilation, alors l'oxygène ne pourra pas pénétrer dans l'enceinte, donc la flamme appauvrira l'enceinte en oxygène jusqu'à ce que soit le combustible, soit l'oxygène soit consommé et que la flamme s'éteigne [14].

Le produit de combustion de l'hydrogène est l'eau, il est donc possible, dans le cas d'une ventilation minimale et d'une petite flamme, que la vapeur d'eau produite par la combustion d'hydrogène combinée à l'appauvrissement en oxygène puisse conduire à l'auto-extinction de la flamme. Si une auto-extinction devait se produire et que la fuite d'hydrogène n'était pas arrêtée au moment de l'extinction, alors il se développerait un scénario où l'enceinte serait remplie d'hydrogène non brûlé. Si la fuite était ensuite coupée, que l'hydrogène était purgé, alors une atmosphère inflammable prémélangée se développerait dans l'enceinte. La présence de surfaces chaudes ou d'une source d'inflammation semblable pourrait conduire à une reprise de feu et à une explosion potentielle. À la limite d'un cas sous-ventilé, la flamme externe existe au niveau de l'événement. Dans le cas de l'auto-extinction, aucune flamme n'existe, ni interne, ni externe. Les détails d'expériences numériques (Tableau 1) sur le jet enflammé d'hydrogène sous-ventilé et la dynamique d'auto-extinction dans une enceinte sont extraits de [13] et décrits ci-dessous.

### 10.3 Mode de flamme à auto-extinction.

Considérons un scénario avec un jet enflammé provenant d'un DDT dans un petit garage aux dimensions  $L \times l \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$  m pour un volume de  $30,4 \text{ m}^3$ . Un seul événement équivalant en superficie à une brique classique de  $L \times H = 25 \times 5$  cm est aligné avec le plafond et exclut la prise en compte des effets de la pression. L'hydrogène est libéré par le tuyau de 5,08 mm au taux de 390 g/s. La combustion de l'hydrogène libéré dans le garage consomme l'oxygène dans l'air et produit de l'eau. Une auto-extinction d'hydrogène dans l'enceinte pourrait être attendue rapidement. En effet, les simulations numériques de ce scénario ont démontré une baisse de la

## Cours 11: Espaces confinés

température dans l'enceinte comme illustré sur la Figure 9 et les régions d'hydroxyle (OH) associées à des zones de réaction après 3 s seulement.

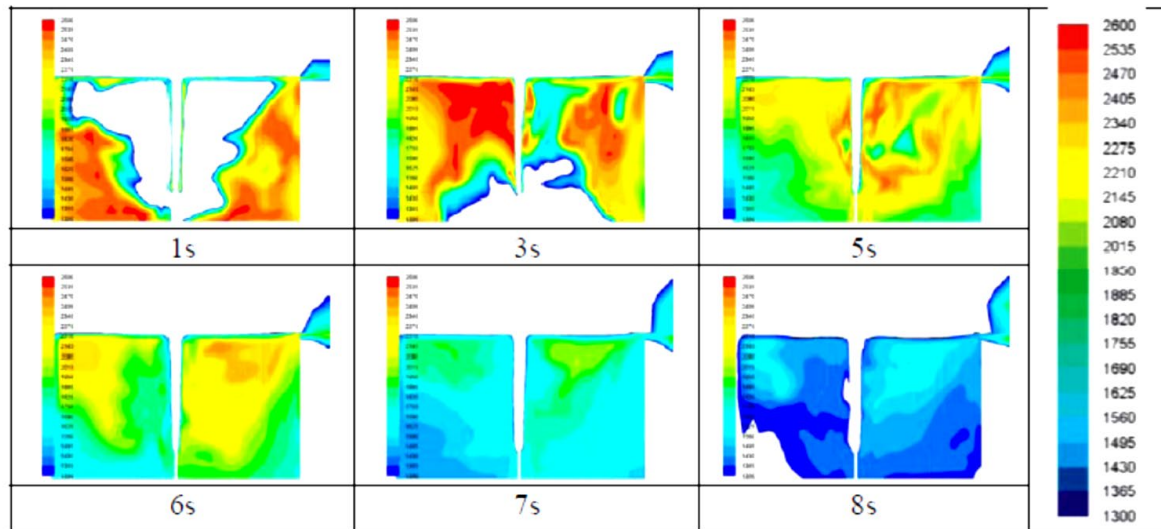


Figure 14. Contours de la température statique allant de 1300 à 2600 °C correspondant à la flamme visible (coupe 2D par le centre du garage) [15].

L'auto-extinction d'une flamme d'hydrogène dans l'enceinte avec un événement horizontal situé au sommet d'un mur a été signalée pour la première fois dans [12]. L'analyse de l'expérience numérique, en particulier de la concentration en hydroxyle (OH), a aidé à comprendre le processus d'auto-extinction. L'utilisation de paramètres moyennés dans tout le volume de l'enceinte pendant l'incendie sous-ventilé peut donner une indication du moment où la combustion est réduite, cependant, elle peut sous-estimer significativement le moment où la flamme est entièrement arrêtée. Les expériences numériques ont démontré un schéma d'écoulement complexe à travers l'évent dans les deux sens pendant l'incendie sous-ventilé. L'auto-extinction complète a été observée lorsque la zone de décharge totale a été occupée pendant une période finie par l'air admis dans l'enceinte. Il a été supposé que cela avait été observé en raison du refroidissement de produits de combustion chauds par la libération d'hydrogène continue et, dans une certaine mesure, par le transfert de chaleur aux murs de l'enceinte. Les travaux [13] développent les expériences numériques initiales et vise à comprendre les incendies d'hydrogène intérieurs dans l'enceinte avec un événement horizontal ou vertical au sommet d'un mur et une libération d'hydrogène continue à un débit et une température constants.

L'auto-extinction des flammes d'hydrogène en intérieur a également été simulée dans l'expérience numérique No. 1 avec l'évent horizontal (Tableau 1) [12]. Considérons la dynamique d'auto-extinction observée dans la simulation No. 2 (vitesse de libération de 300 m/s) et comparons-la avec la simulation No. 1 (vitesse de libération de 600 m/s). La Figure 15 montre la dynamique de la fraction molaire d'OH pour la simulation No. 2 en 3D (Figure 15a) et 2D (Figure 15b). Le contour de la réaction (surface iso de fraction molaire d'OH

## Cours 11: Espaces confinés

de  $1 \times 10^{-4}$ ) montre la localisation de la combustion vive et sort de l'enceinte à environ 30 s. Cette zone de la réaction hors de l'enceinte se sépare de la zone de réaction à l'intérieur de l'enceinte à 45 s et existe jusqu'à environ 56 s. La taille de cette petite zone de réaction externe ne dépasse pas deux hauteurs d'évent. Environ au même moment, soit 56-57 s, de l'air pénètre dans l'enceinte, alimentant une réaction faible juste en dessous de l'évent. Cette zone de réaction interne cesse pratiquement à environ 120 c. Contrairement à l'expérience No. 4 avec la flamme externe, dans la simulation No. 2 avec l'auto-extinction, la combustion dans le jet cesse en premier du côté gauche, qui est plus proche de l'évent, à 55-56 s. Cela peut s'expliquer et concorde avec la présence d'une quantité légèrement supérieure d'oxygène à ce moment en bas à droite du jet (Figure 15a)..

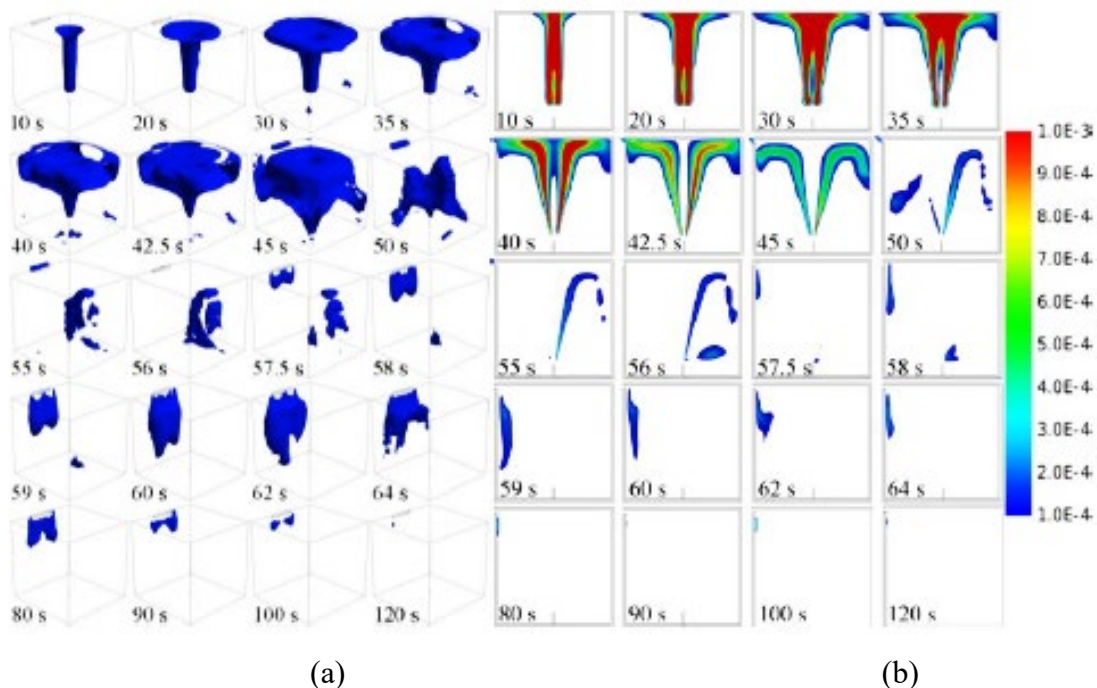


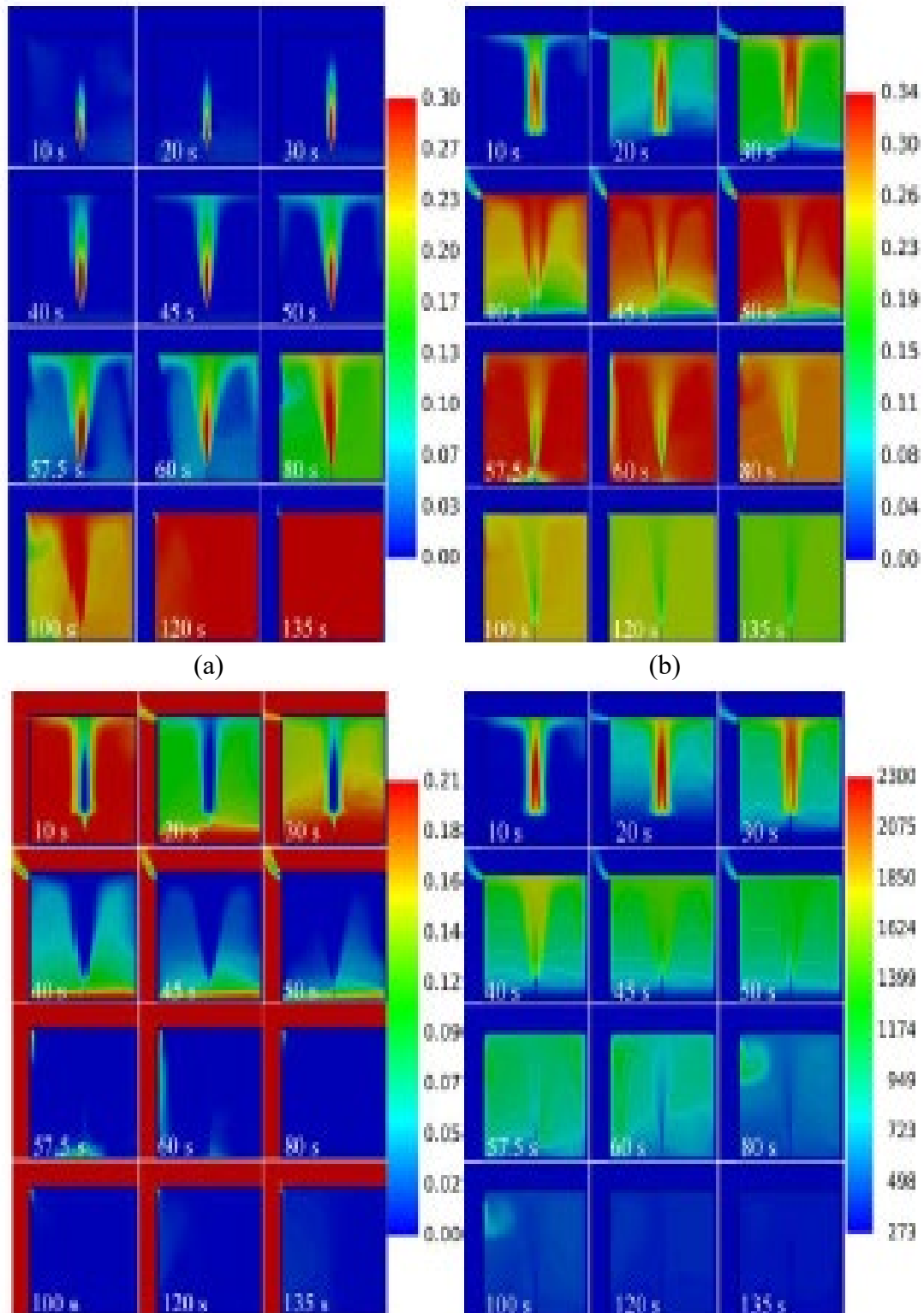
Figure 15. Fraction molaire d'hydroxyle OH dans une enceinte de  $1 \times 1 \times 1$  m, simulation No. 2 (auto-extinction de jet enflammé d'hydrogène) [13] : (a) vue 3D de surface iso d'OH  $1 \times 10^{-4}$ , (b) coupe 2D selon l'axe médian de l'enceinte.

La petite taille de la zone de réaction hors de l'enceinte dans la période de 30 à 56 s peut s'expliquer par l'analyse des concentrations des espèces présentée sur la Figure 11. En effet, pendant cette période, la concentration en hydrogène dans l'écoulement hors de l'enceinte ne dépasse pas environ 7-10 % en volume, la concentration de l'eau augmente d'environ 15 à plus de 34 % en volume, et la concentration en oxygène chute d'environ 10 % en volume à 0 % en volume. Le diagramme d'inflammabilité montre que ce mélange avec l'air est tout juste à la limite de la région inflammable [16]. Dans la simulation No. 2, ce mélange réagit avec l'air dans des conditions où la température du mélange est assez élevée et chute à environ 800 K uniquement à la fin de cette période.



### Cours 11: Espaces confinés

Ainsi qu'il ressort de la Figure 16, l'écoulement hors de l'enceinte se termine après 50 s et seul existe un écoulement vers l'intérieur de l'enceinte (voir les captures d'écran correspondantes de 57,5 s à 120 s). Par conséquent, conformément à la simulation No. 1 pour que l'auto-extinction se produise, il faut une période prolongée durant laquelle, après le stade initial de combustion interne suivie par le refroidissement de produits chauds par l'hydrogène « froid », il y a une admission d'air à travers toute la superficie de l'évent dans l'enceinte.



## Cours 11: Espaces confinés

(c) (d)

Figure 16 Coupe 2D selon l'axe médian de l'enceinte, simulation No. 2 (auto-extinction de jet enflammé d'hydrogène) [13] : (a) fraction molaire de  $H_2$ , (b) fraction molaire de  $H_2O$ , (c) fraction molaire d' $O_2$ , et (d) température.

La Figure 11 (a) montre que, après 2 minutes de libération, l'enceinte est remplie avec de l'hydrogène à la fraction molaire au-dessus du niveau stœchiométrique,  $> 0,30$ . De même que pour la simulation No. 4 avec l'évent vertical, le jet est légèrement incliné vers le mur avec l'évent. La fraction molaire maximale d'eau est observée à 50-60 s. Il existe une forte « stratification » de l'oxygène à 40-50 s, avec une concentration pratiquement nulle en haut et une concentration en oxygène pratiquement initiale de 20,7 % en volume en bas. La température chute à environ 100 degrés au-dessus de la température initiale après 2 minutes de libération enflammée. Ce résultat peut être utilisé comme une indication de durée de résistance au feu des composants dans l'enceinte de la pile à combustible.

La précédente conclusion selon laquelle l'auto-extinction est toujours observée lorsqu'il existe une période d'admission d'air dans l'enceinte à travers toute la superficie d'évent est confirmée dans l'expérience correspondant aux conditions de la simulation No. 6 (Tableau 1) avec l'évent vertical de la plus petite superficie. Pour étayer encore cette règle, dans la simulation No. 7 (flamme externe), une telle période n'était pas présente.

#### 10.4 Mode de flamme externe

La Figure 17 démontre les résultats de la simulation No. 4 pour la libération à la vitesse de 600 m/s, lorsqu'une transition d'un jet enflammé interne dans l'enceinte à un mode de flamme externe se produit. La fraction molaire d'hydroxyles dans la flamme à 10 s est égale à 0,01, ce qui est caractéristique de la combustion aux conditions atmosphériques normales. La fraction molaire d'OH maximale se réduit donc avec le rétrécissement de la zone où la plus grande fraction molaire d'OH est présente. Cela serait dû à une dilution de la flamme-jet par les produits de combustion entraînés. La fraction molaire maximale d'OH ne dépasse pas  $7,5 \times 10^{-3}$  à 20 s.

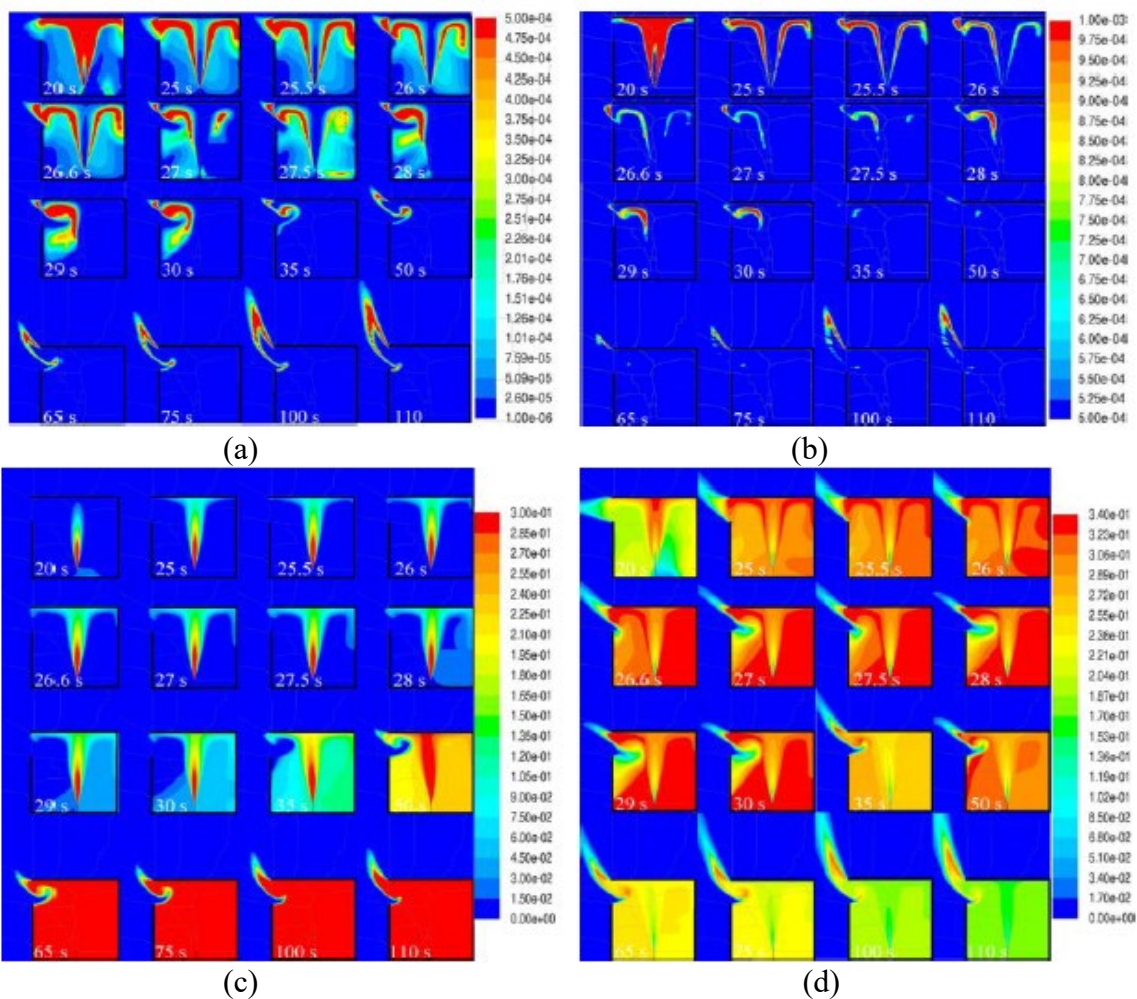
La Figure 17a montre l'évolution de la zone de réaction pendant la transition de la combustion interne à la flamme externe par visualisation de la fraction molaire d'OH dans la plage de  $1 \times 10^{-6}$  à  $5 \times 10^{-4}$ , tandis qu'une image sur la Figure 12b correspond à la plage de  $5 \times 10^{-4}$ - $1 \times 10^{-3}$ . Il n'existe pas ou très peu de réaction hors de l'enceinte jusqu'à 20 s. Si le taux de combustion à l'intérieur de l'enceinte décroît après 20 s, la zone de réaction commence à sortir de l'enceinte à travers l'évent, la flamme externe étant visible au-dessus de l'enceinte après 50 s. Les Figures 17a et 17b montrent clairement que la réaction cesse tout d'abord du côté de la flamme-jet qui est opposé à l'évent situé en haut du mur gauche. La Figure 17b démontre qu'il existe une zone de réaction continue des deux côtés de l'évent. Cette zone connecte la réaction interne dans la zone où de l'air frais pénètre dans l'enceinte à la flamme externe du mélange d'hydrogène et de produits de combustion s'écoulant hors de l'enceinte dans l'air atmosphérique.

## Cours 11: Espaces confinés

Ces deux écoulements opposés à travers l'évent créent un tourbillon de réaction qui se situe dans l'enceinte à proximité de l'évent et stabilise le bord inférieur de la flamme. Le bord supérieur de la flamme externe est attaché au bord supérieur de l'évent.

L'évolution de la fraction molaire d'hydrogène dans l'enceinte est représentée sur la Figure 17c. L'incendie se trouve dans le régime bien ventilé jusqu'à environ 20 s où il n'y a pas d'hydrogène quittant l'enceinte du fait de sa combustion complète à l'intérieur. L'accumulation d'hydrogène est légèrement supérieure sur le côté du jet opposé au mur avec l'évent. On observe une certaine inclinaison du jet vers l'évent (voir la capture d'écran à 50 s). La fraction molaire de l'hydrogène est supérieure à 0,30 dans presque toute l'enceinte à 65 s à l'exclusion d'une petite région proche de l'évent où l'air pénètre. La fraction molaire de l'hydrogène à 110 s est de 0,48 à 0,50 au niveau du sol et du plafond, respectivement.

La quantité de vapeur d'eau maximale est observée à 27-30 s (Figure 17d), comme dans la simulation No. 1 avec un événement horizontal de la même superficie indiqué en [12]. Après cela, la fraction molaire de l'eau diminue de façon monotone avec le temps en raison de l'entraînement de l'eau dans le jet d'hydrogène continu et l'écoulement hors de l'enceinte (en tant que partie du mélange inflammable).



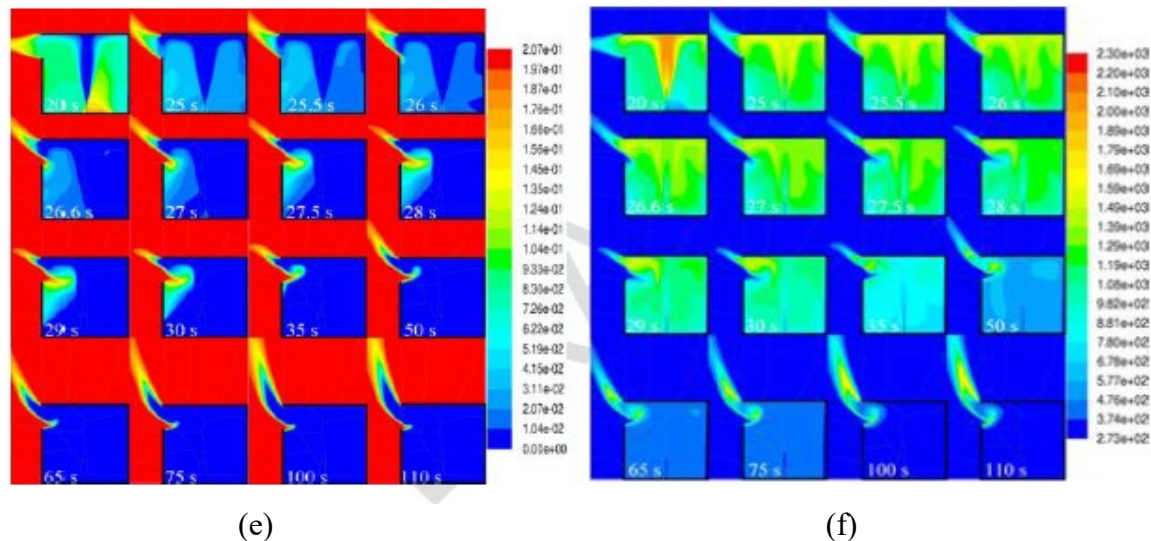


Figure 17. Coupe 2D selon l'axe médian de l'enceinte, simulation No. 4 (mode flamme externe de jet enflammé d'hydrogène) [13] : (a) fraction molaire d'OH, plage  $1 \times 10^{-6}$ – $5 \times 10^{-4}$ , (b) fraction molaire d'OH, plage  $5 \times 10^{-4}$ – $1 \times 10^{-3}$ , (c) fraction molaire de  $H_2$ , (d) fraction molaire de  $H_2O$ , (e) fraction molaire d' $O_2$ , et (f) température.

À un temps critique pour la « survie » de la flamme d'environ 50 s, où la transition à la flamme externe commence, la fraction molaire d'hydrogène dans l'écoulement vers l'extérieur augmente jusqu'à environ 0,2 et celle de l'eau (diluant) chute jusqu'à 0,2-0,3. Cette composition de mélange est considérée comme étant dans la plage inflammable d'après le diagramme d'inflammabilité pour le mélange hydrogène-air-diluant à la pression et la température atmosphériques, si l'effet de la température est négligé. Par conséquent, la disponibilité du mélange inflammable s'écoulant hors de l'enceinte et la présence de réaction (source d'inflammation) fournissent les conditions pour la transition de la combustion hors de l'enceinte.

La Figure 12e montre que la fraction molaire de l'oxygène dans l'enceinte diminue progressivement et est pratiquement nulle à 35 s, à l'exclusion d'une petite zone proche de l'événement. Ensuite, l'air pénétrant dans l'enceinte jusqu'à une certaine profondeur faible brûle et est immédiatement entraîné en un écoulement d'hydrogène et de produits de combustion sortant de l'enceinte à travers la partie supérieure de l'événement. La dynamique de température à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte est représentée sur la Figure 12f. La capture d'écran correspondant à 50 s démontre un rôle important du tourbillon de réaction, qui est formé dans la couche de cisaillement de l'événement entre le mélange quittant l'enceinte et l'air pénétrant dans l'enceinte, sur la stabilité de la flamme et la transition de l'incendie interne sous-ventilé vers le mode de flamme externe.

Pour l'événement horizontal de la même superficie, l'établissement de la flamme externe a été observé dans la simulation No. 3 à une vitesse inférieure de l'hydrogène, de 150 m/s. La même vitesse de la libération que dans la simulation No. 4 (événement vertical), à savoir 600 m/s, pour l'événement horizontal a provoqué l'auto-extinction de la flamme (simulation No. 1). L'auto-



## Cours 11: Espaces confinés

extinction a été observée également à la vitesse de 300 m/s (simulation No. 2). Par conséquent, une vitesse limite séparant le mode de flamme externe et le mode d'auto-extinction se situe entre 150 m/s et 300 m/s pour la géométrie d'enceinte donnée.

La flamme externe est observée dans la simulation No. 7 avec un événement vertical de la plus petite superficie et pour la vitesse de libération de 300 m/s. L'augmentation de la vitesse de libération à 600 m/s (simulation No. 6) a provoqué l'auto-extinction. Il faut remarquer qu'une caractéristique du phénomène d'auto-extinction est l'existence d'une période où il existe une admission d'air dans l'enceinte à travers toute la superficie de l'événement (non une partie de la superficie d'événement).

## 11. Utilisation du e-Laboratory

### 11.1 Ventilation passive dans une enseinte avec un événement: concentration d'hydrogène uniforme

Cet outil est constitué de trois options permettant le calcul des trois caractéristiques suivantes :

1. Concentration uniforme d'hydrogène à l'état stable pour le taux de libération et la taille d'événement donnés ;
2. Paramètres d'événement pour obtenir une concentration souhaitée pour la libération donnée ;
3. Taux de libération pour obtenir la concentration souhaitée pour les tailles d'événement données.

Les théories peuvent être consultées à la Section 5 de cette conférence. Pour appliquer l'outil, comme illustré sur la Figure 18, la première étape consiste à sélectionner le modèle qui est utilisé pour des problèmes particuliers.

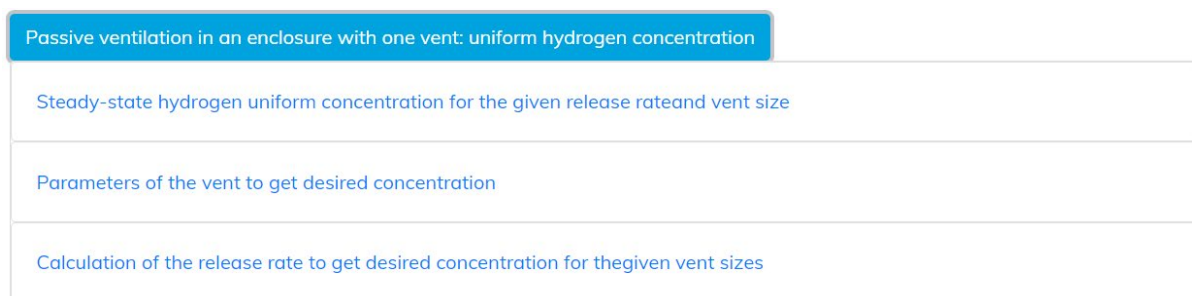


Figure 18 Sélection du bon modèle pour un problème particulier

#### **Problème 1 : Concentration uniforme d'hydrogène à l'état stable pour le taux de libération et la taille d'événement donnés.**

Les paramètres d'entrée sont indiqués dans le Tableau 2 et la capture d'écran du paramétrage de l'outil est présentée sur la Figure Figure 19.

Tableau 2 Paramètre d'entrée pour le problème 1

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Débit massique d'hydrogène	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s	0,0001-1	0,001
Pression ambiante	$p_2$	Pa	33700-107900	101325
Température ambiante	$T_2$	K	240-350	293
Hauteur d'évent	$H$	m	0,001-10	2
Largeur d'évent	$l$	m	0,001-10	1
Coefficient de décharge	$C_D$	-	0,4-1	0,6

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Ambient pressure

$p_{atm}$  101325 Pa

Ambient temperature

$T_{atm}$  293 K

Hydrogen mass flow rate

$\dot{m}_{H_2}$  0.00001 kg/s

Discharge coefficient

$C_D$  0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Figure 19. Paramétrage de l'outil pour le problème 1

Le paramètre de sortie est la fraction volumique d'hydrogène. Un exemple de paramètre de sortie est présenté sur la Figure 15 qui indique que, pour la valeur donnée des paramètres d'entrée sur la Figure 20, la fraction volumique de l'hydrogène calculée est de 0,048377 dans l'enceinte.

## Cours 11: Espaces confinés

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	$C_D$	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figure 20. La sortie de l'outil pour le problème 1

### Problème 2 : Paramètres de l'événement pour obtenir la concentration d'hydrogène souhaitée.

Cet outil permet à l'utilisateur de calculer les paramètres de l'événement, par ex. g. largeur ou hauteur, pour le dégagement éventuel afin de ne pas dépasser le niveau requis de concentration en hydrogène e. g. 25 % à partir de la limite inférieure d'inflammabilité de 4 % (LII).

Les paramètres d'entrée sont indiqués dans le tableau 3 et la capture d'écran du réglage de l'outil est illustrée à la figure 21. Il convient de noter que, dans ce cas, soit la hauteur de l'événement, H, soit la largeur de l'événement, W doit être donnée en tapant une valeur pour H ou W et en laissant le paramètre inutile (H ou W) vide. Par exemple, si H est utilisé comme paramètre d'entrée, W doit être vierge du réglage, et vice versa.

Tableau 3 Paramètre d'entrée pour le problème 2

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Débit massique d'hydrogène	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s	0,0001-1	0,001
Pression ambiante	$p_2$	Pa	33700-107900	101325
Température ambiante	$T_2$	K	240-350	293
Choisissez la hauteur ou la largeur	H/l	m	0,001-10	2
Coefficient de décharge	$C_D$	-	0,4-1	0,6
Fraction molaire d'hydrogène souhaitée	X	-	0-1	0,04

## Cours 11: Espaces confinés

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

#### » Parameters of the vent to get desired concentration

Ambient pressure  
 Pa

Ambient temperature  
 K

Hydrogen mass flow rate  
 kg/s

Volume fraction of hydrogen

Discharge coefficient

Vent height  
 m

Vent width

Figure 21. Paramétrage de l'outil pour le problème 2

Le paramètre de sortie est soit la hauteur d'évent, soit la largeur d'évent à un débit massique donné. Un exemple de paramètre de sortie est présenté sur la Figure 22 qui indique que, pour la valeur donnée des paramètres d'entrée sur la Figure 21, la largeur de ventilation requise est de 0,2 m lorsque la hauteur de ventilation est réglée sur 0,2 m.

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

#### » Parameters of the vent to get desired concentration

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	$P_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	$C_D$	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Figure 22. Résultats de l'outil pour le problème 2

### Problème 3 : Taux de libération pour obtenir la concentration souhaitée de tailles d'évent données

Cet outil permet de calculer le débit massique qui pourrait être autorisé pour que les paramètres d'évent particuliers ne dépassent pas le niveau de concentration en hydrogène requis, par ex. 25 % de la limite inférieure d'inflammabilité de 4 % (LII).

Les paramètres d'entrée sont indiqués dans le Tableau 4 et la capture d'écran du paramétrage de l'outil est présentée sur la Figure 23.

Tableau 4 Paramètre d'entrée pour le problème 3

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Pression ambiante	$p_2$	Pa	33700-107900	101325
Température ambiante	$T_2$	K	240-350	293
Hauteur d'évent	$H$	M	0,001-10	2
Largeur d'évent	$l$	m	0,001-10	1
Coefficient de décharge	$C_D$	-	0,4-1	0,6
Fraction molaire d'hydrogène souhaitée	$X$	-	0-1	0,04

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Ambient pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Ambient temperature

$T_{atm}$  293 K

Volume fraction of hydrogen

$X$  0.04837701757210591

Discharge coefficient

$C_D$  0.6

Vent height

$H$  0.2 m

Vent width

$W$  0.2 m

Calculate Reset

Figure 23. Paramétrage de l'outil pour le problème 3

Le paramètre de sortie est le débit massique d'hydrogène exigé. Un exemple de paramètre de sortie est présenté sur la Figure 24 qui indique que, pour la valeur donnée des paramètres d'entrée sur la Figure 23, le débit massique d'hydrogène requis est  $1e-5 \text{ kg s}^{-1}$ .

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	$X$	0.048377	
Discharge coefficient	$C_D$	0.6	
Vent height	$H$ height	0.2	m
Vent width	$W$	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figure 24. Résultats de l'outil pour le problème 3

## 11.2 Phénomène de pic de pression pour libération non enflammée. peaking phenomenon for unignited release

Cet outil est constitué de deux options permettant de résoudre les deux problèmes suivants :

1. Phénomène de pic de pression avec débit massique constant
2. Phénomène de pic de pression avec purge de réservoir

La théorie du phénomène de pic de pression (PPP) a été examinée en détail dans la section 6 de la présente conférence. Pour appliquer l'outil, comme illustré sur la Figure 25, la première étape consiste à sélectionner le modèle qui est utilisé pour des problèmes particuliers. La description du modèle devrait apparaître en appuyant sur le bouton correspondant sur l'écran d'accueil de l'outil.

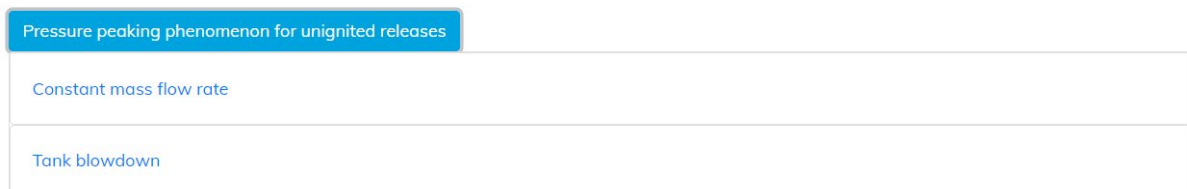


Figure 25. Sélection du bon modèle pour un problème particulier de PPP

### Problème 1 : Phénomène de pic de pression avec débit massique constant.

Les paramètres d'entrée sont indiqués dans le Tableau 5 et la capture d'écran du paramétrage de l'outil est présentée sur la Figure 26.

Tableau 5 Paramètre d'entrée pour le problème 1 de PPP (cas non enflammé)

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Pression atmosphérique	$p_{atm}$	Pa	101325 – 90000000	101325
Température d'enclainte	$T_{encl}$	K		293,15
Volume d'enclainte	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		30,42
Hauteur d'évent	$H_{vent}$	m		0,05
Largeur d'évent	$W_{vent}$	m		0,25
Débit massique d'hydrogène	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s		0,39
Coefficient de décharge	$C_D$	-		0,6
Intervalle pour l'intégration	$\Delta t$	s		1
Nombre d'intervalles pour les intégrations	$n_{last}$	-	500-100000	1000

## Cours 11: Espaces confinés

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

## » Constant mass flow rate

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m<sup>3</sup>

Vent height

 m

Vent width

 m

Hydrogen mass flow rate

 kg/s

Coefficient of discharge

Time step for integration

 s

Number of time steps for integration

Figure 26. . Paramètres d'entrée du problème 1 de PPP (cas non enflammé)

Une fois le calcul terminé, le graphique de PPP de la pression  $p_{g\_encl}$  (axe Y) en fonction du temps  $t$  (axe X) doit être tracé. L'axe de pression doit présenter un titre d'axe lité aux unités de pression choisies au départ, par ex. Pression (bar/Pa/kPa etc.). Un exemple de paramètre de sortie est présenté sur la Figure 27.



## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	0.39	kg/s
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
Time step for integration	$\Delta t$	1	s
Number of time steps for integration	$n_{max}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{gencl}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figure 27. Résultats de l'outil pour le problème 1 de PPP (cas non enflammé)

Le tracé de la pression en fonction du temps est présenté sur la Figure 28.

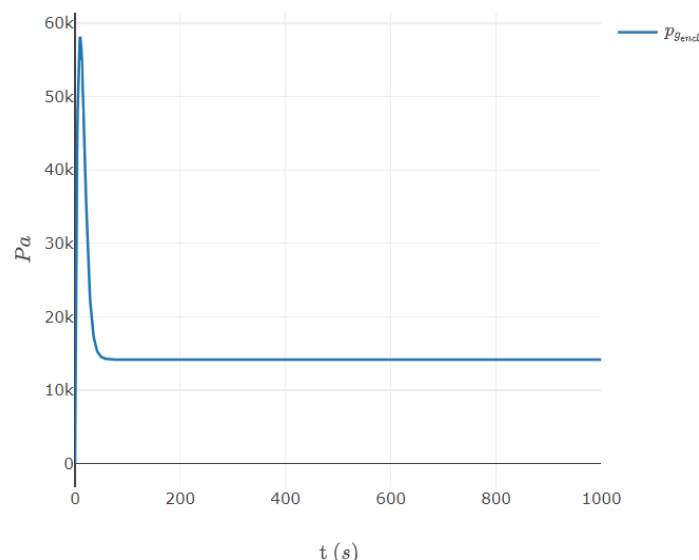


Figure 28. Tracé de la pression en fonction du temps du problème 1 de PPP (cas non enflammé)

### Problème 2 : Phénomène de pic de pression avec purge de réservoir.

Les paramètres d'entrée sont indiqués dans le Tableau 6 et la capture d'écran du paramétrage de l'outil est présentée sur la Figure 29

Tableau 6 Paramètre d'entrée pour le problème 2 de PPP (cas non enflammé)

Cours 11: Espaces confinés

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Pression atmosphérique	$p_{atm}$	Pa	101325 – 90000000	101325
Température d'enceinte	$T_{encl}$	K		
Volume d'enceinte	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		
Hauteur d'évent	$H_{vent}$	m		
Largeur d'évent	$W_{vent}$	m		
Coefficient de décharge	$C_D$	-		0,6
Pression d'hydrogène initiale dans le réservoir	$p_{res}^0$	Pa		
Température d'hydrogène initiale dans le réservoir	$T_{res}$	K		
Volume de réservoir	$V_{res}$	m <sup>3</sup>		
Diamètre d'orifice	$d_3$	m		
Supposition initiale du temps d'intégration	$t_{j0}$	s		
Nombre d'intervalles pour les intégrations	$i_{last}$	-		

## Cours 11: Espaces confinés

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

## » Tank blowdown

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m<sup>3</sup>

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

H2 pressure in reservoir

 Pa

H2 temperature in reservoir

 K

Reservoir volume

 m<sup>3</sup>

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Figure 29. Paramètres d'entrée du problème 2 de PPP (cas non enflammé)

Une fois le calcul terminé, le graphique de PPP pour la pression  $p_{g\_encl}$  (axe Y) en fonction du temps  $t$  (axe X) doit être tracé. L'axe de pression doit présenter un titre d'axe lité aux unités de pression choisies au départ, par ex. Pression (bar/Pa/kPa etc.). Un exemple de paramètre de sortie est présenté sur la Figure 30

Cours 11: Espaces confinés

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

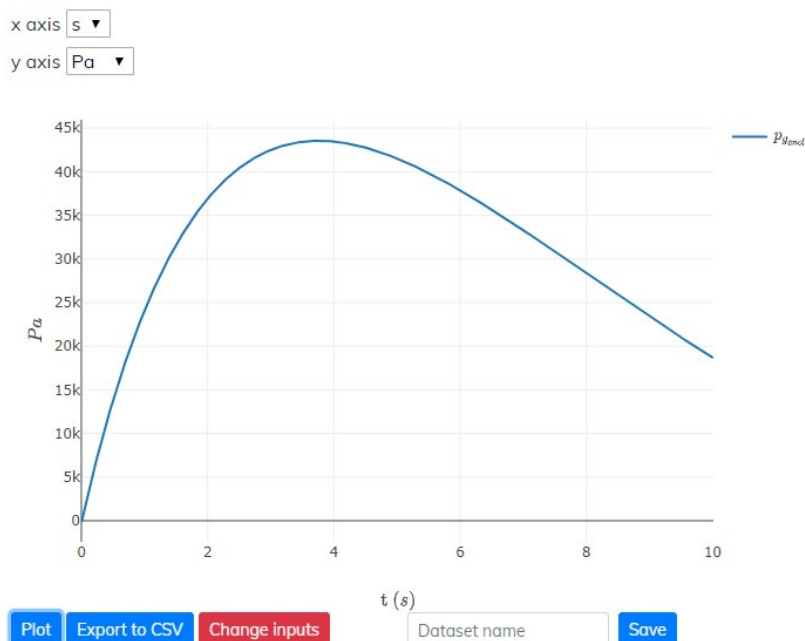
Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
H2 pressure in reservoir	$p_{res}$	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_{res}$	114.878	K
Reservoir volume	$V_{res}$	0.196	m <sup>3</sup>
Orifice diameter	$d_3$	0.0095	m
Initial guess for integration time	$t_{f_0}$	10	s
Number of time steps for integration	$n_{max}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
H2 mass in reservoir	$m_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Density in notional nozzle	$\rho_4$	<a href="#">view</a>	kg/m <sup>3</sup>
Velocity in notional nozzle	$V_4$	<a href="#">view</a>	m/s
Notional nozzle diameter	$d_4$	<a href="#">view</a>	m
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{gend}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figure 30. Résultats de l'outil pour le problème 2 de PPP (cas non enflammé)

Le tracé de la pression en fonction du temps est présenté sur la Figure 31.



## Cours 11: Espaces confinés

Figure 31. Tracé de la pression en fonction du temps du problème 2 de PPP (cas non enflammé)

### 11.3 Phénomène de pic de pression pour libération enflammée

Semblable au phénomène de pic de pression (PPP) pour libération non enflammée, l'outil pour calculer le PPP pour une libération enflammée est également constitué de deux options, relatifs à deux problèmes différents, comme ceux du PPP pour une libération non enflammée.

Tout d'abord, les utilisateurs doivent choisir l'outil intitulé Phénomène de pic de pression pour libération enflammée dans la liste des outils du e-Laboratoire. Puis, ils sélectionnent le Phénomène de pic de pression enflammé (débit massique constant) pour résoudre le problème 1 ou le Phénomène de pic de pression enflammé (purge de réservoir) pour résoudre le problème 2, comme illustré sur la Figure 32.



Figure 32. Sélection du bon outil pour un problème particulier.

#### Problème 1 : Phénomène de pic de pression avec débit massique constant.

Les paramètres d'entrée sont énumérés dans le Tableau 7 et une capture d'écran du paramétrage de l'outil est présentée sur la Figure 33, respectivement. La différence des paramètres d'entrée du cas enflammé est l'exigence d'un paramètre supplémentaire,  $C_I$ .

Tableau 7 Paramètre d'entrée pour le problème 1 de PPP (cas enflammé)

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Pression atmosphérique	$p_{atm}$	Pa	101325 – 90000000	101325
Température d'enceinte	$T_{encl}$	K		293,15
Volume d'enceinte	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		30,42
Hauteur d'évent	$H_{vent}$	m		0,05
Largeur d'évent	$W_{vent}$	m		0,25
Débit massique d'hydrogène	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s		0,39
Coefficient de décharge	$C_D$	-		0,6
Intervalle pour l'intégration	$\Delta t$	s		1
Nombre d'intervalles pour les intégrations	$n_{last}$	-		1000
Coefficient pour une libération enflammée	$C_I$	-		1

## Cours 11: Espaces confinés

**Remarque :** La valeur d'entrée pour  $C_I$  surlignée en jaune devrait apparaître uniquement pour le cas enflammé..

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Atmospheric pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Enclosure temperature

$T_{encl}$  293.15 K

Enclosure volume

$V_{encl}$  30.42 m<sup>3</sup>

Vent height

$H_{vent}$  0.05 m

Vent width

$W_{vent}$  0.25 m

Hydrogen mass flow rate

$\dot{m}_{H_2}$  0.017 kg/s

Coefficient of discharge

$C_D$  0.6

Sought factor

$\alpha_c$  22

Time step for integration

$\Delta t$  1 s

Number of time steps for integration

$n_{max}$  1000

Calculate Reset

Figure 33. Paramètres d'entrée du problème 1 de PPP (cas enflammé)

La capture d'écran des paramètres de sortie et un exemple du tracé de la pression en fonction du temps sont présentés sur la Figure 34 et la Figure 35, respectivement.

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	0.017	kg/s
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
Sought factor	$\alpha_c$	22	
Time step for integration	$\Delta t$	1	s
Number of time steps for integration	$n_{max}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{g_{encl}}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figure 34. La sortie de l'outil pour le problème 1 de PPP (cas déclenché)

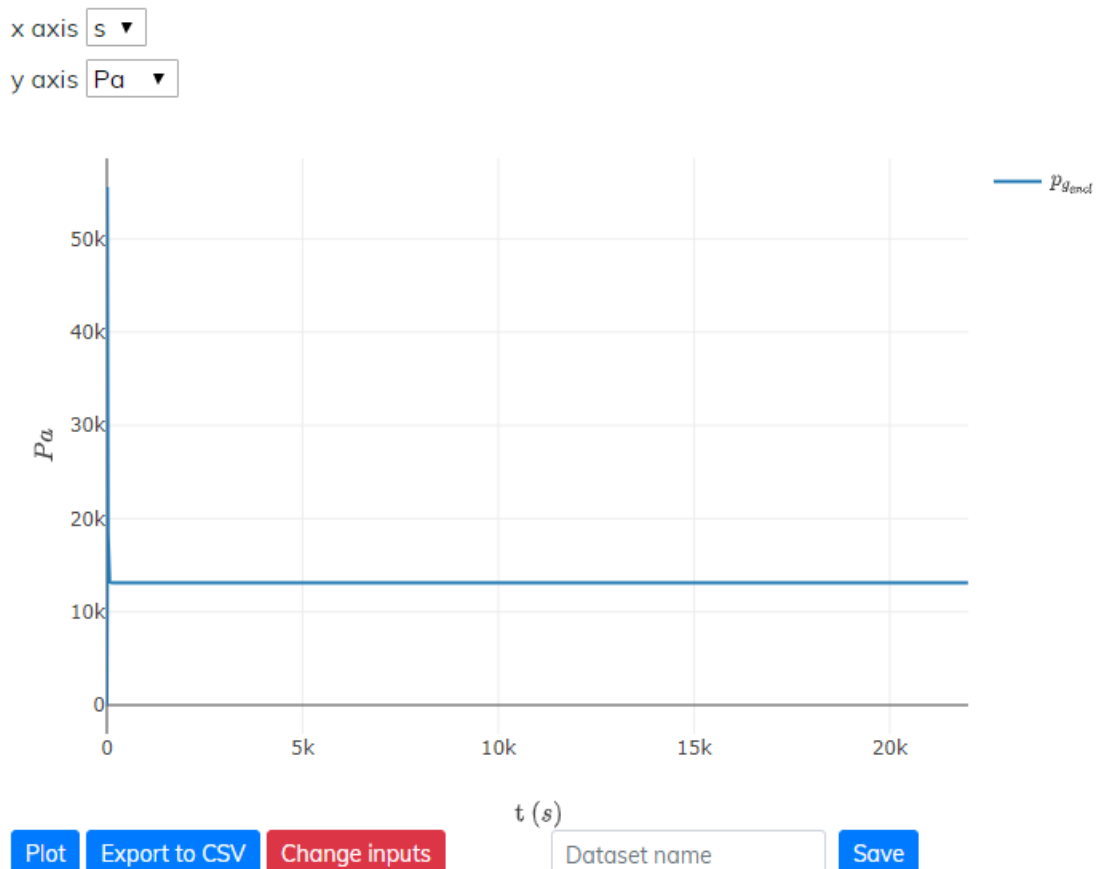


Figure 35. Le tracé de la pression en fonction du temps du problème 1 du PPT (cas allumé)

### Problème 2 : Phénomène de pic de pression avec purge de réservoir.



## Cours 11: Espaces confinés

Les paramètres d'entrée sont énumérés dans le Tableau 8 et une capture d'écran du paramétrage de l'outil est présentée sur la Figure 38, respectivement.

Tableau 8 Paramètre d'entrée pour le problème 2 de PPP (cas enflammé)

Nom de paramètre	Symbole	Unité	Limites (min-max)	Valeurs par défaut
Pression atmosphérique	$p_{atm}$	Pa	101325 – 90000000	101325
Température d'enceinte	$T_{encl}$	K		
Volume d'enceinte	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		
Hauteur d'évent	$H_{vent}$	m		
Largeur d'évent	$W_{vent}$	m		
Coefficient de décharge	$C_D$	-		0,6
Pression d'hydrogène initiale dans le réservoir	$p_{res}^0$	Pa		
Température d'hydrogène initiale dans le réservoir	$T_{res}$	K		
Volume de réservoir	$V_{res}$	m <sup>3</sup>		
Diamètre d'orifice	$d_3$	m		
Supposition initiale du temps d'intégration	$t_{f0}$	s		
Nombre d'intervalles pour les intégrations	$i_{last}$	-		
Coefficient pour une libération enflammée	$C_I$	-		1

## Cours 11: Espaces confinés

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

## » Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m<sup>3</sup>

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

Sought factor

H2 pressure in reservoir

 Pa

H2 temperature in reservoir

 K

Reservoir volume

 m<sup>3</sup>

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Figure 36. Figure 31. Paramètres d'entrée du problème 2 de PPP (cas enflammé)

La capture d'écran des paramètres de sortie et un exemple du tracé de la pression en fonction du temps sont présentés sur la Figure 37 et la Figure 38, respectivement.

Cours 11: Espaces confinés

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
Sought factor	$\alpha_c$	22	
H2 pressure in reservoir	$p_{res}$	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_{res}$	114.878	K
Reservoir volume	$V_{res}$	0.196	m <sup>3</sup>
Orifice diameter	$d_3$	0.0095	m
Initial guess for integration time	$t_{f_0}$	10	s
Number of time steps for integration	$n_{maz}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
H2 mass in reservoir	$m_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Density in notional nozzle	$\rho_4$	<a href="#">view</a>	kg/m <sup>3</sup>
Velocity in notional nozzle	$V_4$	<a href="#">view</a>	m/s
Notional nozzle diameter	$d_4$	<a href="#">view</a>	m
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{gencl}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figure 37. Résultats de l'outil pour le problème 2 de PPP (cas enflammé)

## Cours 11: Espaces confinés

x axis s ▾

y axis Pa ▾

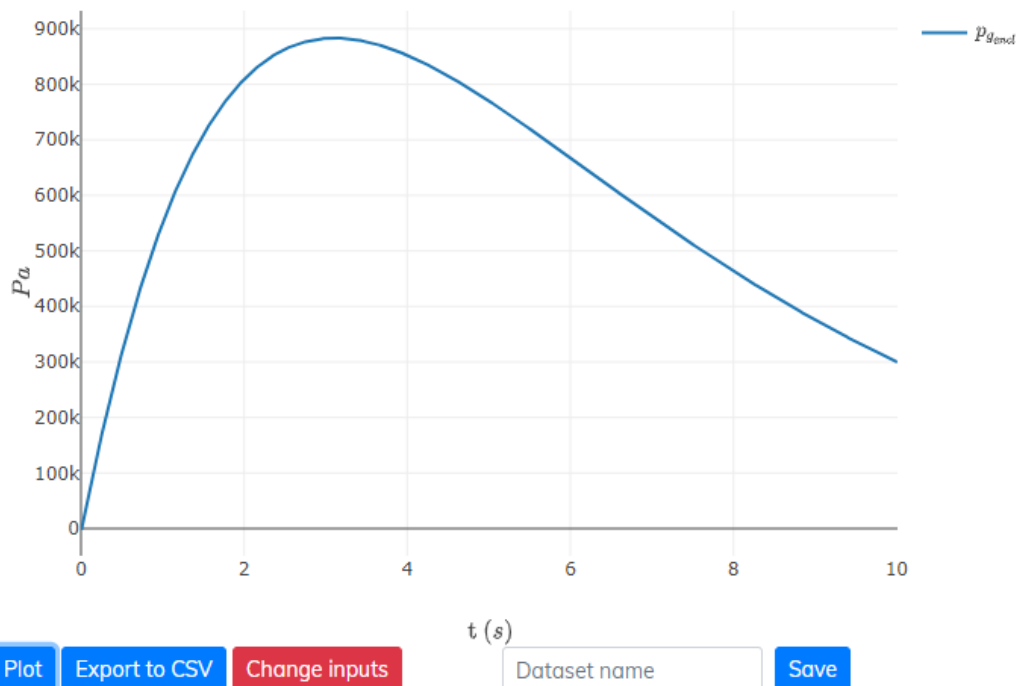


Figure 38. Tracé de la pression en fonction du temps du problème 2 de PPP (cas enflammé)

## Remerciements

Le projet HyResponse est mentionné, car les documents présentés ici sont enrichis sur la base des conférences HyResponse originales.

## Références

1. HyIndoor project. Available from <https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>. [accessed 07.12.20]
2. HyResponder Deliverable D1.1 – Report on hydrogen safety aspects of technologies, systems and infrastructures (2020). Deliverable will be publically available from: <https://hyresponder.eu/deliverables/> when approved
3. Saffers, J-B and Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39, pp. 6268-6285.
4. HyIndoor Deliverable D5.1 – Widely accepted guidelines on FC indoor installation and use (2015). Available from: [http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines\\_D5.1\\_Final-version3a.pdf](http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines_D5.1_Final-version3a.pdf) [accessed 07.12.20].
5. Karlsson, B and Quintiere, J (2000). Enclosure fire dynamics. CRC Press.
6. 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.
7. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
8. 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.
9. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ and Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, The Netherlands.
10. Molkov, V, Shentsov, V and Quintiere, J (2014). Passive ventilation of a sustained gaseous release in an enclosure with one vent. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39 (15), pp. 8158– 8168
11. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D , Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: Numerical experiments International Journal of Hydrogen Energy Volume 39, Issue 20, 3 July 2014, Pages 10788-10801
12. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Dynamics of Hydrogen Flame Self-Extinction in a Vented Enclosure. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Seminar on Fire and Explosion Hazards”, 5-10 May 2013, Providence, RI, USA.

## Cours 11: Espaces confinés

13. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: numerical experiments. Proceedings of ICHS 2013, 9-11 September 2013, Brussels, Belgium.
14. HyTunnel Deliverable D3.1 – Detailed research programme for hydrogen fires in confined structures (2019). Available from: [https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS\\_D3.1\\_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf) [accessed 07.12.20].
15. Molkov, V, Bragin, M, Brennan, S, Makarov, D, and Saffers, J-B (2010). Hydrogen Safety Engineering: Overview of Recent Progress and Unresolved Issues. International Symposium of Combustion and Fire Dynamics, October 2010, Santander, Spain.
16. Trevino, C and Mauss, F (1992). Chapter 10 “Structure and Extinction of Non-Diluted Hydrogen-Air Diffusion Flames”, In: Peters, N., Rogg, B., Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems. Lecture Notes in Physics, Volume m15. Springer-Verlag, 1992.
17. 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 07.12.20].
18. Brennan, S, Makarov, D and Molkov, V (2010). Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Leeds, April 2010.
19. SAE J2579 (2009). Technical information report for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles, SAE International, Detroit, Michigan, USA, January, 2009.
20. Emmons, DD (1995). Vent flows, SFPE Handbook, ed. P. J. Di Nenno, (2<sup>nd</sup> Edition). Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, USA.
21. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
22. Kuznetsov, M., Grune, J., Friedrich, A., Sempert, K., Breitung, W., Jordan, T. (2011) Hydrogen-air deflagrations and detonations in a semi-confined flat layer. In: Fire and Explosion Hazards, Proceedings of the Sixth International Seminar (Edited by D. Bradley, G. Makhviladze and V. Molkov), 125-136.
23. Alekseev, V.I., Kuznetsov, M.S., Yankin, Yu., G., Dorofeev, S.B. (2001) Experimental study of flame acceleration and DDT under conditions of transverse venting. J. Loss Prev. Proc. Ind., 14/6: 591-596.

Cours 11: Espaces confinés

24. Dorofeev, S.B., Kuznetsov, M.S., Alekseev, V.I., Efimenko, A.A., Breitung, W. (2001) Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures. *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, 14 (6): 583-589.
25. Friedrich, A., Grune, J., Jordan, T., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kuznetsov, M., Sempert, K., Stern, G. (2007) Experimental study of hydrogen-air deflagrations in flat layer. In: *Proc. 2nd ICHS International Conference on Hydrogen Safety*. September 11 - 13, 2007 San Sebastian – SPAIN, paper 1.3.106, 1-12.
26. United States, Department of Energy.  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current\\_technology.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current_technology.html).
27. Brennan S, Makarov D and Molkov V. “Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent”. In: *Proceedings of the 6th International seminar on fire and explosion hazards*. England: Research Publishing; July 2011. ISBN 978-981-08-7724-8.
28. S. Brennan, V. Molkov. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38: 8159-8166.
29. H. Hussein, S. Brennan, V. Molkov. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45: 23882-23897.