



Programme européen de formation des formateurs pour le personnel de secours

Cours 7

Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

NIVEAU IV

Officier spécialiste

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

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

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

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



Clause de non-responsabilité

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

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

Remerciements

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

Résumé

Les libérations involontaires d'hydrogène dans l'air conduisent à la formation d'un mélange inflammable, créant ainsi les conditions initiales des risques d'incendie et d'explosion. Les libérations non enflammées impliquent l'émission d'hydrogène gazeux comprimé stocké à haute pression dans les systèmes et infrastructures de PCH (piles à combustible et hydrogène). Les libérations accidentelles d'hydrogène gazeux comprimé relèvent de deux grandes catégories : les fuites par perméation et les jets à haute pression. L'une des questions importantes que doit se poser le personnel de secours est de savoir si une libération d'hydrogène gazeux va conduire à la formation d'un mélange inflammable avec l'air. En utilisant la loi de similitude et la théorie des jets sous-détendus, le personnel de secours sera en mesure d'évaluer la taille du panache d'hydrogène inflammable et de calculer la décroissance de la concentration en hydrogène le long de l'axe du jet. En outre, le personnel de secours apprendra à calculer le temps de purge et à évaluer la dynamique des pressions dans un réservoir de stockage d'une capacité connue. Enfin, ce cours présente au personnel de secours les moyens de réduire la distance de sécurité à partir du point de libération ainsi que les mesures de prévention/d'atténuation/de détection applicables aux libérations d'hydrogène non enflammées.

Mots-clés

Libération non enflammée, loi de similitude, théorie des jets sous-détendus, panache d'hydrogène, décroissance de la concentration en hydrogène, purge, distance de sécurité, mesures d'atténuation, détection

Table des matières

Résumé.....	3
Mots-clés	3
1. Public cible.....	5
1.1 Description du rôle : spécialiste	5
1.2 Niveau de compétence : spécialiste	5
1.3 Apprentissage préalable : spécialiste.....	5
2. Introduction et objectifs	6
3. Définitions utiles	7
4. Fuites d'hydrogène comprimé	7
4.1 Jets détendus et sous-détendus	9
4.2 Jets subsoniques, soniques et supersoniques.....	11
4.3 Jets contrôlés par l'inertie et par la flottabilité	12
5. Décroissance de la concentration en hydrogène dans les jets contrôlés par l'inertie.....	12
6. Réduction de la distance de sécurité à partir d'une libération d'hydrogène	21
6.1 Quand un jet devient-il flottant ?.....	21
6.2 Pour un dispositif de décompression thermique, qu'est-ce qu'un diamètre sûr ?.....	24
7. Purge d'un réservoir de stockage d'hydrogène comprimé	24
8. Prévention des fuites d'hydrogène	30
9. Mesures d'atténuation des libérations non enflammées.....	32
10. Détection des fuites d'hydrogène	33
11. Outils pertinents de l'e-Laboratoire.....	37
11.1 Modèle de paramètres des jets.....	37
11.2 Loi de similitude relative à la décroissance de la concentration et à la distance de sécurité	39
11.3 Calcul de la flottabilité	40
Remerciements.....	42
Références	42

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

1. Public cible

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

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

1.1 Description du rôle : spécialiste

Les officiers spécialistes assistent les commandants d'opération. Ils les conseillent, dirigent et supervisent les opérations techniques qui requièrent de mobiliser des connaissances, des compétences ou des équipements liés à un risque spécifique ou à une activité d'intervention. Les incidents classiques impliquent des matières dangereuses, des véhicules de transport, des phénomènes climatiques, des défaillances structurelles et d'autres défaillances de l'environnement bâti, ainsi que la logistique des interventions d'urgence.

1.2 Niveau de compétence : spécialiste

Une base scientifique, technique et empirique dans le domaine concerné ainsi que des compétences renforcées par l'expérience, permettant d'appliquer ces informations et connaissances en connaissance de cause, pour que le commandant d'opération et le personnel de secours sous la direction de l'officier spécialiste puissent réagir efficacement et en toute sécurité aux situations d'urgence.

1.3 Apprentissage préalable : spécialiste

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

2. Introduction et objectifs

La défaillance de l'équipement ou la perte d'étanchéité d'un système de PCH peut être à l'origine d'une libération involontaire d'hydrogène. Les conséquences d'un tel événement peuvent varier en fonction des caractéristiques de la libération et de l'emplacement de la source de fuite, à savoir à l'extérieur ou à l'intérieur. Si, au départ, la libération n'est pas enflammée, il est toujours possible qu'elle s'enflamme, au bout d'un certain temps, si une source d'inflammation se trouve sur sa trajectoire. Si la libération d'hydrogène a lieu à l'intérieur, les conséquences seront plus graves que pour une libération se produisant à l'extérieur, car une atmosphère explosive peut s'accumuler dans un espace confiné. Toutes ces conséquences peuvent affecter les personnes, les structures et l'environnement. Des incidents mineurs peuvent s'aggraver et conduire à une issue dramatique.

Ce cours est principalement axé sur les libérations d'hydrogène non enflammées ayant lieu à l'air libre. Il présente également la classification des fuites d'hydrogène comprimé ainsi que la terminologie utile. Les intervenants sont initiés à la loi de similitude et à la théorie des jets sous-détendus, ce qui leur permettra d'évaluer la décroissance de la concentration en hydrogène et de déterminer la distance de sécurité entre le point de libération et la limite inférieure d'inflammabilité ou toute autre concentration présentant un intérêt. Ce cours détaille les moyens de réduire la distance de sécurité à partir de la source de libération d'hydrogène. Il aborde également les mesures de prévention, d'atténuation et de détection des libérations d'hydrogène non enflammées provenant de réservoirs de stockage d'hydrogène comprimé.

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

- De classer les libérations d'hydrogène non enflammées (fuites/jets) et de faire la distinction entre les fuites par perméation, les jets subsoniques, soniques et supersoniques, les jets détendus et sous-détendus, les jets contrôlés par l'inertie et par la flottabilité ;
- D'évaluer la décroissance de la concentration en hydrogène dans les jets contrôlés par l'inertie à l'aide du nomogramme correspondant ;
- De prévoir la distance à laquelle un jet d'hydrogène devient flottant ;
- De calculer la taille du panache inflammable d'hydrogène, c'est-à-dire de déterminer le point le plus éloigné de la source de fuite auquel un jet peut s'enflammer ;
- D'évaluer la bonne taille d'un dispositif de décompression thermique (DDT) afin d'éviter la formation d'une couche d'hydrogène inflammable sous le plafond d'un espace clos ;
- De calculer le temps de purge de réservoirs d'hydrogène comprimé de différentes capacités ;
- De reconnaître les moyens de réduire la distance de sécurité à partir du point de libération ;

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

- D'indiquer les principales techniques de prévention des jets d'hydrogène ;
- De reconnaître les mesures d'atténuation des conséquences des fuites d'hydrogène ;
- D'indiquer les moyens de détection des libérations d'hydrogène.

3. Définitions utiles

Purge : processus pendant lequel la pression de stockage décroît au fil du temps en raison d'une fuite.

Jet détendu : jet dont la pression à la sortie de la buse est égale à la pression atmosphérique.

Nombre de Mach (M ou Ma) : nombre sans dimension égal au rapport entre la vitesse locale d'écoulement et la vitesse locale du son.

Perméation : mouvement des atomes, des molécules ou des ions dans ou à travers une substance poreuse ou perméable.

Distance de sécurité : distance entre la source de danger et la zone où ce danger menace des personnes, des équipements ou l'environnement (selon une échelle allant de « sans danger » à « danger maximal ») (d'après la définition du projet de norme ISO TC197). Cette distance est déterminée par une modélisation physique, numérique ou une réglementation, et correspond à une valeur du milieu ambiant (généralement, pression ou température).

Jet sous-détendu : jet dont la pression à la sortie de la buse est supérieure à la pression atmosphérique.

4. Fuites d'hydrogène comprimé

Comme indiqué dans les cours précédents, les véhicules à pile à combustible sont équipés de réservoirs de stockage d'hydrogène embarqués dont la pression peut atteindre 70 MPa, et une infrastructure de ravitaillement fonctionne à des pressions allant jusqu'à 100 MPa [1]. Du fait de la petite taille de ses molécules, l'hydrogène a tendance à fuir. Les fuites et les libérations d'hydrogène proviennent principalement des vannes et des raccords [2] ; elles peuvent survenir à l'intérieur aussi bien qu'à l'extérieur. Les libérations peuvent être non enflammées (c'est-à-dire sans réaction) ou enflammées (c'est-à-dire avec réaction). Bien que la rupture totale d'une conduite ou d'un réservoir soit rare, elle doit être considérée comme le pire scénario vraisemblable. Il convient de déployer des efforts particuliers pour empêcher les libérations involontaires d'hydrogène. Une libération d'hydrogène, qu'elle ait lieu à travers un dispositif de décompression ou suite à la rupture d'une conduite, entraînera un jet à haute pression.

Le Tableau 1 synthétise les types de fuites et les équipements ou composants à l'origine des fuites d'hydrogène [3].

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Tableau 1. Sources de fuite et scénarios élaborés par l'EIGA (2007) [3]

Équipement/composant	Type de fuite
Canalisations	Trous d'épingle, conduite fendue
Brides	Joint défectueux, mouvement thermique, fluage des matériaux
Assemblage par soudure	Fissure de soudure
Raccord soudé	Fissure de soudure, matière à souder fondue
Raccord d'assemblage	Mouvement thermique, fuite
Raccord par vis	Fuite, défaut d'étanchéité, fluage, matériau fendu
Raccordement des flexibles	Fuite au niveau du joint, matériau fendu, erreur humaine
Vannes	Fuite au niveau de la tige, fuite au niveau du joint, capot/boîtier fendu et ouvert à la suite d'un impact
Flexibles	Fente par perforation
Instruments	Rupture des éléments
Régulateurs	Rupture de la membrane, fuite au niveau du joint, rupture en aval (surpression)
Électrovannes	Fuite au niveau du joint
Pompes	Perforation, fuite au niveau du joint
Cylindre	Perforation, rupture, fuite par perméation

Les débits typiques des libérations d'hydrogène varient considérablement, allant de 10^{-5} g/s pour les fuites par perméation à 10^5 g/s pour les fuites au niveau des pipelines d'hydrogène. Selon le Règlement européen relatif à l'homologation des véhicules à hydrogène (2010), le *taux de perméation sans risque* des véhicules à pile à combustible à 15 et 20 °C est limité à 6 et 8 mL/h par litre de capacité d'un réservoir de stockage [4]. Autrement dit, pour une capacité de 170 L de stockage d'hydrogène, le taux de perméation s'élèvera à $2,53 \times 10^{-5}$ g/s. Le débit en cas de fuite au niveau d'une conduite cassée (sur une pile à combustible de 150 kW) sera d'environ 3 g/s. À une pression de 2,5 MPa, la libération provenant d'un pipeline industriel (d'un diamètre de 30 cm) aura un débit de 100 kg/s. Actuellement, une libération à travers un dispositif de décompression (d'un diamètre de 5,08 mm) à partir d'un réservoir de stockage à 35 MPa générera un débit de 390 g/s.

Une libération d'hydrogène induite par perméation diffère des panaches et des jets ; l'hydrogène est libéré lentement, en très petites quantités, de manière uniforme le long de la surface d'un réservoir de stockage. Le taux de perméation de l'hydrogène à travers un matériau donné dépend de plusieurs paramètres tels que la température, la pression interne et l'épaisseur de la membrane. Plus la pression de stockage est élevée, plus le taux de perméation est important (reportez-vous au Cours 3 « Stockage de l'hydrogène »). La dispersion de l'hydrogène

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

s'échappant par perméation est influencée par trois phénomènes : la flottabilité, la diffusion et la ventilation naturelle. L'hydrogène s'échappant par perméation est distribué de manière homogène dans un espace clos de type garage [5]. À 20 °C, le taux de perméation maximal autorisé s'élève à 8 mL/h/L pour un véhicule de tourisme et à 5 mL/h/L pour un bus à pile à combustible dans un espace clos de type garage [6]. Les simulations réalisées par le centre HySAFER de l'université d'Ulster ont démontré qu'avec un tel taux de perméation, la dispersion de l'hydrogène dans un garage classique ne pose pas problème [5].

Une libération accidentelle d'hydrogène stocké à haute pression peut générer un jet turbulent fortement *sous-détendu* (la pression à la sortie de la buse est supérieure à la pression atmosphérique) qui se comporte différemment des jets *détendus* (la pression à la sortie de la buse est égale à la pression atmosphérique). Ce phénomène a été largement étudié par le passé. La Figure 1 donne une représentation schématique d'une libération d'hydrogène provenant d'un réservoir de stockage à haute pression. La majeure partie des fuites provenant d'équipements de stockage d'hydrogène se présentent sous forme de jet sous-détendu, au moins au début [1].

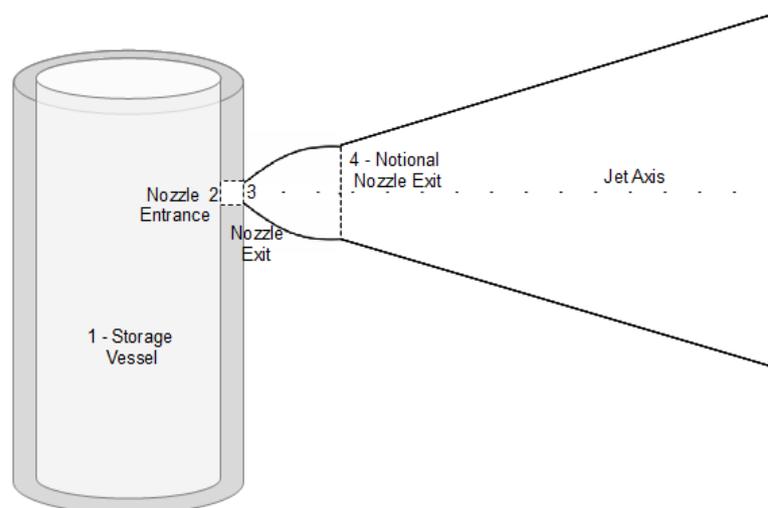


Figure 1. Schéma d'une libération d'hydrogène provenant d'un réservoir de stockage d'hydrogène à haute pression.

4.1 Jets détendus et sous-détendus

Les jets d'hydrogène peuvent être détendus ou sous-détendus. Un *jet détendu* est un jet dont la pression à la sortie de la buse est égale à la pression atmosphérique. Dans un *jet sous-détendu*, la pression à la sortie de la buse n'est pas encore aussi basse que la pression atmosphérique. À des pressions élevées, la vitesse à la sortie de la buse reste localement sonique, mais la pression de sortie est supérieure à la pression ambiante. Par conséquent, la détente jusqu'aux conditions ambiantes a lieu à l'extérieur de la buse [1]. Dans des conditions standard de température et de pression, le rapport critique entre la pression de stockage et la pression ambiante permettant

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

d'établir l'écoulement sonique (réduit) d'un gaz compressible est d'environ 1,9. Si le rapport de pression est inférieur à 1,9, l'écoulement de gaz dans l'orifice est détendu (subsonique). Dans le cas contraire, si le rapport est supérieur à 1,9, les libérations sont considérées comme des écoulements sous-détendus (soniques ou réduits).

Dans un jet sous-détendu, la détente de l'écoulement a lieu près de la sortie de la buse et se caractérise par une structure de choc complexe, qui est bien documentée dans la référence [7]. La Figure 2a schématise une structure de choc sous-détendue. Ce diagramme présente une distribution du *nombre de Mach* (M ou Ma), qui est un nombre sans dimension égal au rapport entre la vitesse locale d'écoulement et la vitesse locale du son. Le *disque de Mach* correspond à un choc important, qui est perpendiculaire à la direction de l'écoulement du jet sous-détendu. La Figure 2b présente une simulation numérique de la phase initiale d'une libération d'hydrogène sous-détendue, pour un rapport entre la pression du réservoir de stockage et de l'atmosphère de 160.

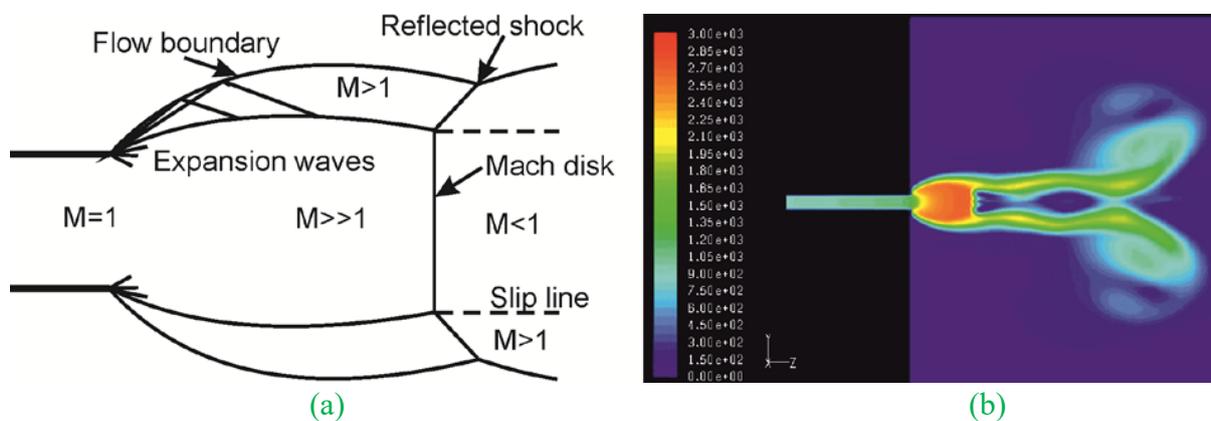


Figure 2. (a) Schéma d'une structure de jet sous-détendu [8] ; (b) Stade initial de libération d'un jet sous-détendu à une pression de 16,1 MPa à travers un canal de 0,25 mm avec un débit massique de 0,46 g/s [1].

Comme le montre la Figure 2a, la vitesse sonique locale est établie à la sortie de la buse pour un nombre de Mach $M = 1$. Ensuite, le gaz sortant se détend et accélère rapidement jusqu'à atteindre des nombres de Mach élevés ($\gg 1$, jusqu'à $M = 8$ pour une pression de stockage de 70 MPa), accompagnés d'une diminution de la pression et de la densité. Une série d'ondes de détente se forme au bord de la sortie de la buse. Ces ondes de détente sont réfléchies sous forme d'ondes de compression par la surface libre à la limite de l'écoulement du jet, fusionnent puis forment un tube à choc et un disque de Mach. Lorsque le rapport de pression est inférieur à 20, des structures répétées de tubes à choc et de disques de Mach apparaissent par intermittence en aval du premier disque de Mach. Pour les pressions de stockage d'hydrogène types, une structure courte comportant un seul disque de Mach est à prévoir au début de la *purge* (processus au cours duquel la pression de stockage diminue au fil du temps en cas de fuite). Lorsqu'un gaz présentant un nombre de Mach très élevé traverse le disque de Mach, sa vitesse diminue soudainement jusqu'à devenir subsonique, tandis que sa pression et sa densité

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

augmentent (jusqu'à la pression atmosphérique). La structure d'écoulement qui en découle en aval du disque de Mach comprend un noyau subsonique ($M < 1$) entouré d'une enveloppe supersonique ($M > 1$), ainsi qu'une couche de rupture appelée « ligne de glissement » séparant ces deux zones.

4.2 Jets subsoniques, soniques et supersoniques

Le nombre de Mach du jet, qui est égal à la vitesse du jet (U) divisée par la vitesse du son dans le gaz (C) sortant dans l'air ambiant, est un paramètre important pour déterminer son comportement. Pour les jets à *écoulement subsonique* $U < C$, $M < 1$, la pression au niveau du plan de sortie est juste égale à (ou très proche de) la pression atmosphérique. Comme indiqué précédemment, bon nombre des fuites provenant d'un dispositif de stockage à haute pression forment un jet *sous-détendu* avec un écoulement *sonique* (réduit) à la sortie du jet (lorsque $U = C$ et $M = 1$). Les jets *supersoniques* se caractérisent par une vitesse supérieure à la vitesse du son ($U > C$).

À des pressions élevées, la vitesse de sortie reste localement sonique, mais la pression de sortie est supérieure à la pression ambiante, de sorte que la détente jusqu'aux conditions ambiantes a lieu à l'extérieur de la buse. Concernant l'hydrogène, le rapport de pression critique pour l'écoulement sonique (réduit) d'un gaz compressible est de 1,89 dans des conditions standard de température et de pression ($\gamma = 1,405$) et de 1,89 dans des conditions normales de température et de pression ($\gamma = 1,39$), d'après l'équation théorique liées aux conditions d'écoulement réduit :

$$\frac{P_R}{P_N} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (1)$$

où P_R et P_N correspondent respectivement à la pression dans le réservoir et à la pression à la sortie de la buse, et où γ correspond au rapport des chaleurs spécifiques. L'équation (1) peut être utilisée pour estimer la pression à la sortie de la fuite (buse) P_N si la pression de stockage dans le réservoir P_R est connue [1].

Ishii et al. [8] ont rapporté que les jets de gaz diatomique ($\gamma = 7/5$) évacués par l'extrémité ouverte d'un tube à essai avaient tendance à être : des jets *subsoniques* pour les rapports de pression dans les chambres à haute et à basse pression (le seul paramètre contrôlant la force du jet) compris entre 1 et 4,1 ; des jets *soniques sous-détendus* pour les rapports de pression compris entre 4,1 et 41,2 ; et des jets *supersoniques sous-détendus* pour les rapports de pression supérieurs à 41,2. Le rapport de pression de 4,1 est supérieur au rapport critique de 1,9 lié aux écoulements soniques (réduits). Cependant, il n'y a pas de contradiction : chacun des deux rapports de pression (celui de la chambre à haute pression vers la sortie du tube et celui de la sortie du tube vers la chambre à basse pression) peut être égal à $P_R/P_N = 2,05$, ce qui est proche du rapport de pression critique théorique de 1,9 lié aux écoulements soniques. La différence pourrait être attribuée aux pertes entre les chambres à haute et à basse pression.

4.3 Jets contrôlés par l'inertie et par la flottabilité

Les jets peuvent être répartis en trois types en fonction de l'effet de flottabilité. La Figure 3 schématise ces trois types de jets pour un jet orienté horizontalement. Les *jets* entièrement contrôlés par l'inertie ne sont pas affectés par la flottabilité, tandis que les *jets* entièrement contrôlés par la flottabilité sont rapidement détournés de la direction horizontale vers la direction verticale de l'écoulement. Le troisième type de jet est un *jet transitionnel*, dont la partie contrôlée par l'inertie se trouve près de la sortie de la buse et dont la partie contrôlée par la flottabilité se trouve plus en aval, lorsque la vitesse du jet diminue et que le diamètre du jet augmente. Il est important de savoir quand a lieu cette transition, car elle influe tout particulièrement sur la distance de sécurité et plus généralement sur la stratégie et la tactique d'intervention [1].

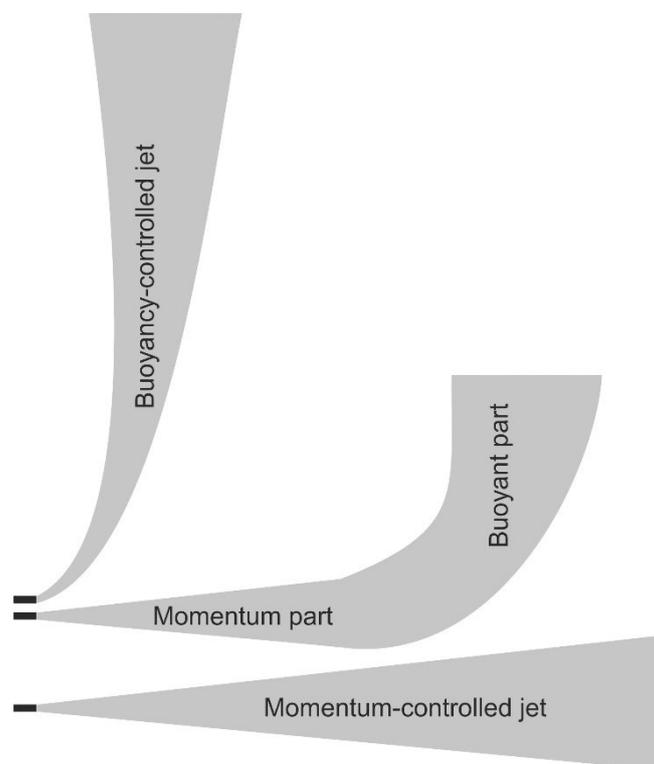


Figure 3. Représentation schématique des jets contrôlés par l'inertie, des jets transitionnels et des jets contrôlés par la flottabilité [1].

5. Décroissance de la concentration en hydrogène dans les jets contrôlés par l'inertie

La concentration en hydrogène d'un jet passe de 100 % au niveau de la buse (c'est-à-dire au niveau du point de fuite) à des valeurs plus faibles le long de l'axe du jet et de l'axe à la périphérie. Pour certains calculs, il est plus pratique de remplacer un jet sous-détendu provenant d'une buse réelle par un jet détendu provenant d'une buse *effective* ou *théorique*. Il existe plusieurs théories liées aux buses. Le modèle le plus souvent invoqué est celui que Birch et al. ont proposé [9] en 1984. Cependant, les premiers modèles s'appuient sur l'équation d'état d'un

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

gaz idéal et ne s'appliquent donc pas aux pressions de stockage supérieures à 10 à 20 MPa, lorsque le comportement non idéal d'un gaz doit être pris en compte. La première théorie des *jets sous-détendus* tenant compte du comportement non idéal de l'hydrogène fortement comprimé a été publiée par Schefer et al. [10] en 2007. Les calculs du diamètre de la buse théorique effectués par Schefer et al. [10] sont similaires à ceux de Birch et al. [9]. Toutefois, l'équation d'Abel-Noble est utilisée et l'hypothèse de Birch et al. concernant la vitesse du son au niveau de la buse théorique est mise de côté [9, 10]. En conséquence, la théorie de Schefer et al. [10] prévoit des vitesses supersoniques uniformes à la sortie de la buse théorique en cas de pressions de stockage élevées.

Molkov et al. [11] ont élaboré une autre théorie des jets sous-détendus que celle proposée par Schefer et al. [10]. Cette théorie est fondée sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie plutôt que sur celles de la masse et de l'inertie. À l'instar du modèle de Birch et al. [9], le modèle élaboré par Molkov et al. [11] repose sur l'hypothèse d'un écoulement sonique uniforme à travers la buse théorique. Le schéma de calcul utilisé pour la théorie des *jets sous-détendus* est représenté sur la Figure 4.

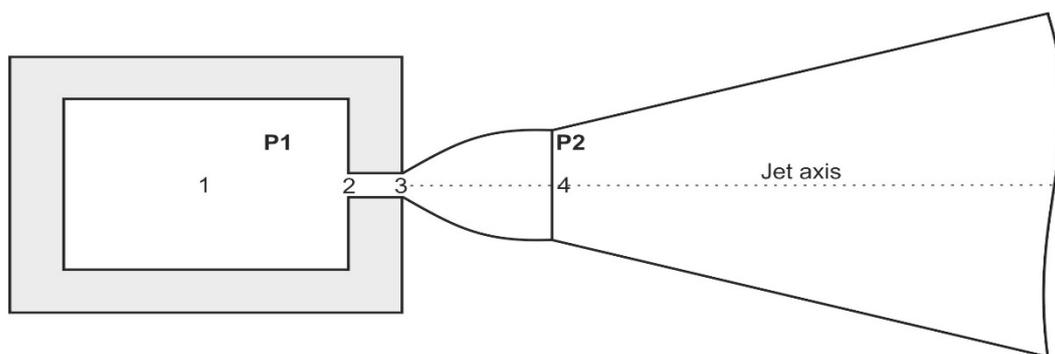


Figure 4. Schéma d'un jet sous-détendu : 1 - réservoir à haute pression ; 2 - entrée de la buse ; 3 - sortie de la buse (= entrée de la buse théorique) ; 4 - sortie de la buse théorique (3-4 : pas d'entraînement) ; P1 - pression de stockage ; P2 - pression atmosphérique (après la détente du jet) [1].

On suppose que la vitesse d'écoulement dans le réservoir de stockage (1) est nulle. Les paramètres d'écoulement sont désignés par le chiffre (2) à l'entrée du canal de fuite et à l'entrée de la buse et par le chiffre (3) à la sortie de la buse réelle. Pour les écoulements soniques et supersoniques, les paramètres à la sortie de la buse (3) correspondent à ceux d'un écoulement réduit et, par conséquent, la vitesse de sortie de la buse est égale à la vitesse locale du son (nombre de Mach $M = 1$). La buse théorique se situe entre la sortie de la buse réelle (3) et la sortie de la buse théorique (4). À la sortie de la buse théorique (4), les paramètres du jet correspondent à un jet entièrement détendu, avec une pression égale à la pression ambiante et une vitesse d'écoulement uniforme égale à la vitesse locale du son. Dans certains cas, il n'est pas possible de négliger les pertes mineures et les pertes par frottement essentielles dans la voie d'écoulement (2) - (3), par exemple dans le cas d'une fissure très étroite [1].

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Comme indiqué précédemment, la combustion représente généralement une préoccupation majeure lorsque l'on examine les critères de danger. Une libération imprévue d'hydrogène provenant d'équipements et d'infrastructures à haute pression entraîne la formation d'un *jet fortement sous-détendu*. Cela peut conduire à la formation d'un grand *panache hydrogène-air inflammable*. La taille du panache inflammable correspond à la distance de sécurité déterministe par rapport à la source de la libération. En cas d'inflammation ultérieure, les personnes, les structures, les équipements et l'environnement peuvent être impliqués dans un incendie. La présence d'une source d'inflammation dans le panache peut entraîner d'importants *jets enflammés*, une *déflagration* et, éventuellement, la *transformation de la déflagration en détonation*. Il convient de noter que les effets thermiques des jets enflammés et les effets de pression des déflagrations ou des détonations peuvent l'emporter sur la distance de sécurité déterminée par la taille du panache inflammable [1]. Pour que les intervenants puissent prendre des décisions éclairées, il est donc essentiel de connaître les lois relatives à la dispersion de l'hydrogène et à la formation de nuages inflammables, y compris la *décroissance de la concentration axiale* des jets arbitraires présentant différents paramètres.

Si le panache inflammable atteint l'admission d'air d'un très haut bâtiment, les conséquences peuvent être catastrophiques pour les occupants et la structure du bâtiment. Il est donc important de déterminer le point le plus éloigné de la fuite auquel un jet peut s'enflammer. Ce point est généralement défini par une concentration en hydrogène de 4 % en volume, c'est-à-dire par la limite inférieure d'inflammabilité (LII). Bien que ce choix de concentration en hydrogène fasse l'objet de débats, un incendie instantané entraîne également un contact direct avec les flammes si une personne se trouve dans le panache d'hydrogène de 4 % en volume lorsque l'hydrogène s'enflamme. La taille du panache inflammable, c'est-à-dire la distance jusqu'à la limite inférieure d'inflammabilité de 4 % en volume, augmente proportionnellement au diamètre [1].

Abordée ci-après, la *loi de similitude* est utilisée pour prédire la *décroissance de la concentration axiale* d'une fuite de gaz pour les jets subsoniques, soniques et supersoniques. La loi de similitude s'avère valable dans de nombreuses conditions, des jets détendus aux *jets fortement sous-détendus*. Elle peut être appliquée pour calculer les *distances de sécurité* en fonction de la taille du panache inflammable. Le comportement non idéal de l'hydrogène à haute pression et l'expansion réduite de l'écoulement à la sortie de la buse sont pris en compte. Dans les publications antérieures de Molkov et de ses collègues [11, 14], ces distances étaient appelées « distances de séparation » ou « distances de sécurité », et leurs définitions variaient d'un document à l'autre. Quelques exemples de définitions sont donnés ci-après :

« la distance minimale qui sépare des cibles spécifiques (par exemple des personnes, des structures ou des équipements) des conséquences d'accidents potentiels liés au fonctionnement d'une installation d'hydrogène » [12].

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

« la séparation minimale entre une source de danger et un objet (un être humain, un équipement ou l'environnement) qui atténuera l'effet d'un incident vraisemblablement prévisible et empêchera qu'un incident mineur ne dégénère en un incident plus important » [3].

Les facteurs suivants influent sur les distances de sécurité :

- la nature du danger,
- les conditions de fonctionnement et la conception des équipements/installations analysés.
- le type de cible/d'objet (personnes, structures, équipements) ;
- l'environnement entre ce dernier et la source de danger. De cette manière, le risque de danger pour les personnes ou les structures peut être évalué et comparé aux critères de danger.

Afin de définir où se forme le mélange hydrogène-air inflammable, il est important de savoir comment la concentration décroît, passant de 100 % en volume au niveau de la buse à la limite inférieure d'inflammabilité, c'est-à-dire à 4 % en volume. La forme originale de la loi de similitude (équation 2) relative à la décroissance de la concentration axiale dans les jets ronds détendus a été proposée par Chen et Rodi [13] en 1980 :

$$C_{ax}^m = 5.4 \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \frac{D}{x} \quad (2)$$

où C_{ax}^m correspond à la fraction de masse axiale d'hydrogène dans le jet à la distance x de la buse, ρ_S correspond à la densité du gaz environnant, c'est-à-dire l'air (1,205 kg/m³ dans des conditions normales de température et de pression), D correspond au diamètre de la buse réelle à la sortie et ρ_N correspond à la densité de l'hydrogène à la sortie de la buse (le seul paramètre inconnu).

La densité « inconnue » ρ_N peut être calculée à l'aide de la *théorie des jets sous-détendus* élaborée et validée par le centre HySAFER de l'Université d'Ulster. La distance jusqu'à la limite inférieure d'inflammabilité est proportionnelle au diamètre de fuite. Ainsi, la conception des systèmes de PCH doit satisfaire aux exigences technologiques en matière de débit massique tout en tenant compte de la nécessité de limiter le diamètre interne des tuyaux pour réduire la distance de sécurité potentielle, comme le montre l'équation (2). Il convient de garder à l'esprit que la valeur ρ_N affecte également la taille du panache inflammable de 4 % en volume (c'est-à-dire la fraction de masse C_m de 0,00288). Plus la pression de fonctionnement d'une application de PCH est élevée, plus la densité ρ_N de la buse théorique est importante et, par conséquent, plus la distance de sécurité est longue.

La loi de similitude (2) permet de conclure que, pour les jets d'hydrogène libérés dans un air stagnant à partir d'une pression de stockage donnée (c'est-à-dire une valeur ρ_N fixe), le rapport entre la distance à une concentration fixe $x = L$ (exprimée en pourcentage de la masse) et le

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

diamètre de la buse D est une constante ; $L/D = \text{const.}$ Cela signifie que la distance de sécurité est proportionnelle au diamètre de fuite. Il convient de noter que la fraction de masse (C_m) peut être calculée à l'aide de l'équation (3), sur la base de la fraction volumétrique (molaire) (C_V) :

$$1/C_m = 1 + (1/C_V - 1)M_S/M_N \quad (3)$$

où M_S et M_N correspondent respectivement aux masses moléculaires du gaz environnant (une valeur de 28,84 g/mol est acceptable pour l'air) et du gaz de la buse (hydrogène). Par exemple, la fraction de masse de 0,0282 correspond à la fraction volumétrique de 0,295 (29,5 % en volume d'hydrogène dans l'air, ce qui équivaut à un mélange stœchiométrique) ; la fraction de masse de 0,044365 correspond à la fraction volumétrique de 0,401 (40,1 % en volume, ce qui équivaut à un mélange présentant une vitesse de combustion maximale) ; 0,013037 - 0,16 (16 % en volume) ; 0,008498 - 0,11 (11 % en volume) ; 0,005994 - 0,08 (8 % en volume) ; 0,00288 - 0,04 (4 % en volume - limite inférieure d'inflammabilité) ; 0,00141 - 0,02 (2 % en volume) ; 0,0007 - 0,01 (1 % en volume).

Dans le cas de jets ronds entièrement détendus, la loi de similitude (2) établit les rapports suivants entre la distance jusqu'à une concentration axiale particulière en hydrogène (en % en volume) L et la taille caractéristique de la buse D (pour une pression atmosphérique au niveau de la buse et des jets subsoniques détendus), avec un rapport de densité $\rho_S/\rho_N = 14,38$: $(L/D)_{30\%} = 49,1$; $(L/D)_{4\%} = 491$; $(L/D)_{2\%} = 1\ 003$; $(L/D)_{1\%} = 2\ 019$. Par exemple, la distance jusqu'à la limite inférieure d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air (4 % en volume) est égale à 491 diamètres de buse dans les jets détendus contrôlés par l'inertie. Veuillez noter que la corrélation (2) de Chen et Rodi [13] a été validée au moyen de mesures de concentration réalisées dans des jets verticaux jusqu'au rapport $L/D = 50$ uniquement. Au-delà de cette plage, son applicabilité doit être confirmée [1].

Si la loi de similitude de Chen et Rodi [13] est appliquée aux jets détendus dans sa forme originale (2), le calcul des distances de sécurité pour les jets ronds d'hydrogène non enflammés est simple : il suffit d'utiliser l'équation (2) avec une densité d'hydrogène à la sortie de la buse $\rho_N = 0,0838 \text{ kg/m}^3$ (dans des conditions normales de température et de pression). Cependant, pour les *jets sous-détendus*, il existe un paramètre inconnu : la densité du gaz à la sortie de la buse réelle ρ_N . Cette densité peut être calculée à l'aide de la théorie des jets sous-détendus, qu'il s'agisse de la variante sans pertes [11] ou avec pertes [14].

La Figure 5 présente la loi de similitude relative à la décroissance de la concentration en hydrogène le long de l'axe des jets contrôlés par l'inertie, ainsi que les données expérimentales relatives aux libérations d'hydrogène sous-détendus.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

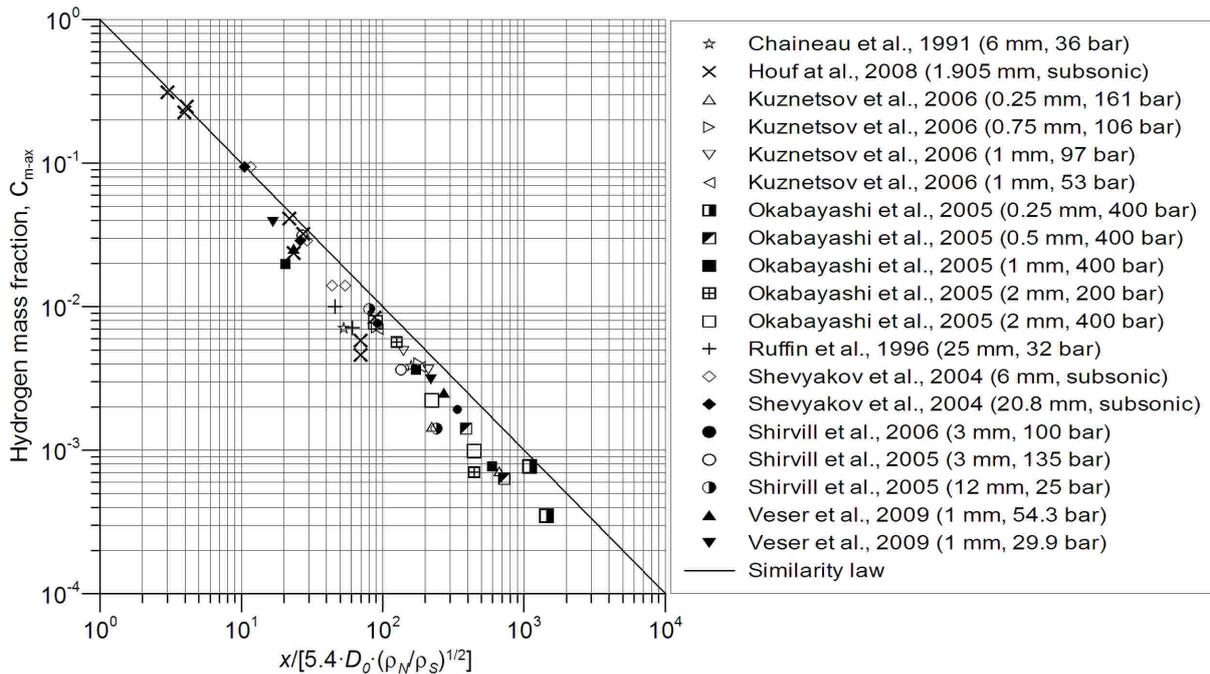


Figure 5. Loi de similitude (ligne droite et continue) et données expérimentales (symboles) relatives à la décroissance de la concentration axiale dans les jets d'hydrogène détendus et sous-détendus contrôlés par l'inertie [1].

Les données expérimentales relatives à la décroissance de la concentration axiale en hydrogène pur dans les jets subsoniques, soniques et supersoniques, contrôlés par l'inertie et provenant de réservoirs de différents volumes mis sous pression jusqu'à 40 MPa, ainsi qu'à travers des buses dont le diamètre va de 0,25 à 100 mm, sont rapportées dans la référence [2]. La concentration en hydrogène dans l'air est comprise entre 1 et 86,6 % en volume. La loi de similitude a été validée pour les rapports x/D compris entre 4 et 28 580. Des jets laminaires et turbulents, détendus et sous-détendus et contrôlés par l'inertie ont été utilisés pour valider le caractère universel de la loi de similitude [2]. Veuillez noter que la loi de similitude demeure prudente par rapport aux données expérimentales. Ceci est dû à l'effet du frottement et des pertes mineures observés dans le cadre des expériences.

Comme indiqué précédemment, la fraction de masse de l'hydrogène correspondant à la limite inférieure d'inflammabilité (4 % en volume) est de 0,00288. Si nous utilisons cette valeur conjointement à la densité de l'air de 1,205 kg/m³ (dans des conditions normales de température et de pression), l'équation (2) est simplifiée comme suit :

$$x_{4\%} = 1708 \cdot \sqrt{\rho_N} \cdot D \quad (4)$$

Cette formule peut être utilisée pour évaluer la taille du panache inflammable à 4 % en volume d'hydrogène (distance de sécurité pour une libération d'hydrogène non enflammée).

L'ampleur de la libération d'hydrogène non enflammée peut être calculée à l'aide de deux méthodes :

1. Le nomogramme de la décroissance de la concentration en hydrogène.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

2. L'e-Laboratoire (<https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory/>).

La Figure 6 est un *nomogramme* permettant d'évaluer graphiquement la décroissance de la concentration en hydrogène en fonction de la loi de similitude et de la théorie des jets sous-détendus sans pertes. Ce nomogramme comporte quatre graphiques intitulés : « Fraction volume-masse », « Loi de similitude », « Choisir le diamètre de fuite » et « Choisir la densité à la sortie de la buse », ainsi qu'un graphique supplémentaire intitulé « Calculer la densité à la sortie de la buse en fonction de la pression et de la température du réservoir de stockage » (basé sur les calculs de la théorie des jets sous-détendus sans pertes).

Ci-dessous figure un exemple d'utilisation du nomogramme pour calculer la distance entre la buse (par exemple de 1 mm de diamètre) et une concentration de 4 % en volume d'hydrogène dans l'air (ligne en pointillés bleus) le long de l'axe de libération d'un réservoir de stockage, à une pression de 70 MPa et à une température de 300 K.

1. Tracez une ligne verticale entre le point de l'axe horizontal « Fraction de volume d'hydrogène », correspondant à la concentration présentant un intérêt (4 % en volume ou 0,04), et la ligne du graphique « Fraction volume-masse » (coin supérieur gauche de la Figure 6).
2. Tracez une ligne horizontale entre ce point d'intersection et la ligne de la loi de similitude dans le coin supérieur droit du graphique « Loi de similitude » (Figure 6).
3. Tracez une ligne verticale entre le point d'intersection obtenu sur le graphique « Loi de similitude » et la ligne correspondant à un diamètre de 1 mm sur le graphique « Choisir le diamètre de fuite » (Figure 6). Veuillez noter que le graphique « Choisir le diamètre de fuite » comporte huit lignes, chacune correspondant aux diamètres de fuite suivants (de haut en bas) : 15 mm, 10 mm, 5 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,1 mm. Ces chiffres figurent sur le côté droit du graphique.
4. Calculez la densité à l'aide du graphique supplémentaire « Calculer la densité à la sortie de la buse en fonction de la pression et de la température du réservoir de stockage » situé en bas du nomogramme, en vous reportant à la pression indiquée (70 MPa dans notre exemple) sur l'axe des ordonnées et à la température choisie (300 K). Ce chiffre est indiqué par deux grosses flèches grises sur le graphique « Calculer la densité à la sortie de la buse en fonction de la pression et de la température du réservoir de stockage ». La densité indiquée par le graphique à la sortie de la buse pour une pression de 70 MPa et une température de 300 K est d'environ 23 kg/m³.
5. En revenant sur le graphique « Choisir le diamètre de fuite », tracez une ligne horizontale entre le point d'intersection avec la ligne « 1 mm » et une ligne imaginaire correspondant à 23 kg/m³ (située entre deux lignes figurant sur le graphique : 20 kg/m³ et 50 kg/m³). Veuillez noter que ce graphique comporte cinq lignes, correspondant respectivement aux densités de 1 kg/m³, 3 kg/m³, 10 kg/m³, 20 kg/m³ et 50 kg/m³, de haut en bas. Ces chiffres figurent sur le côté gauche du graphique.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

- Tracez une ligne verticale entre le point d'intersection avec la ligne imaginaire correspondant à 23 kg/m^3 et l'axe des abscisses « Distance jusqu'à la concentration présentant un intérêt » du graphique « Choisir la densité à la sortie de la buse ». Ainsi, la distance indiquée par le graphique entre la sortie de la buse et la concentration en hydrogène de 4 % en volume est d'environ 7,7 m.

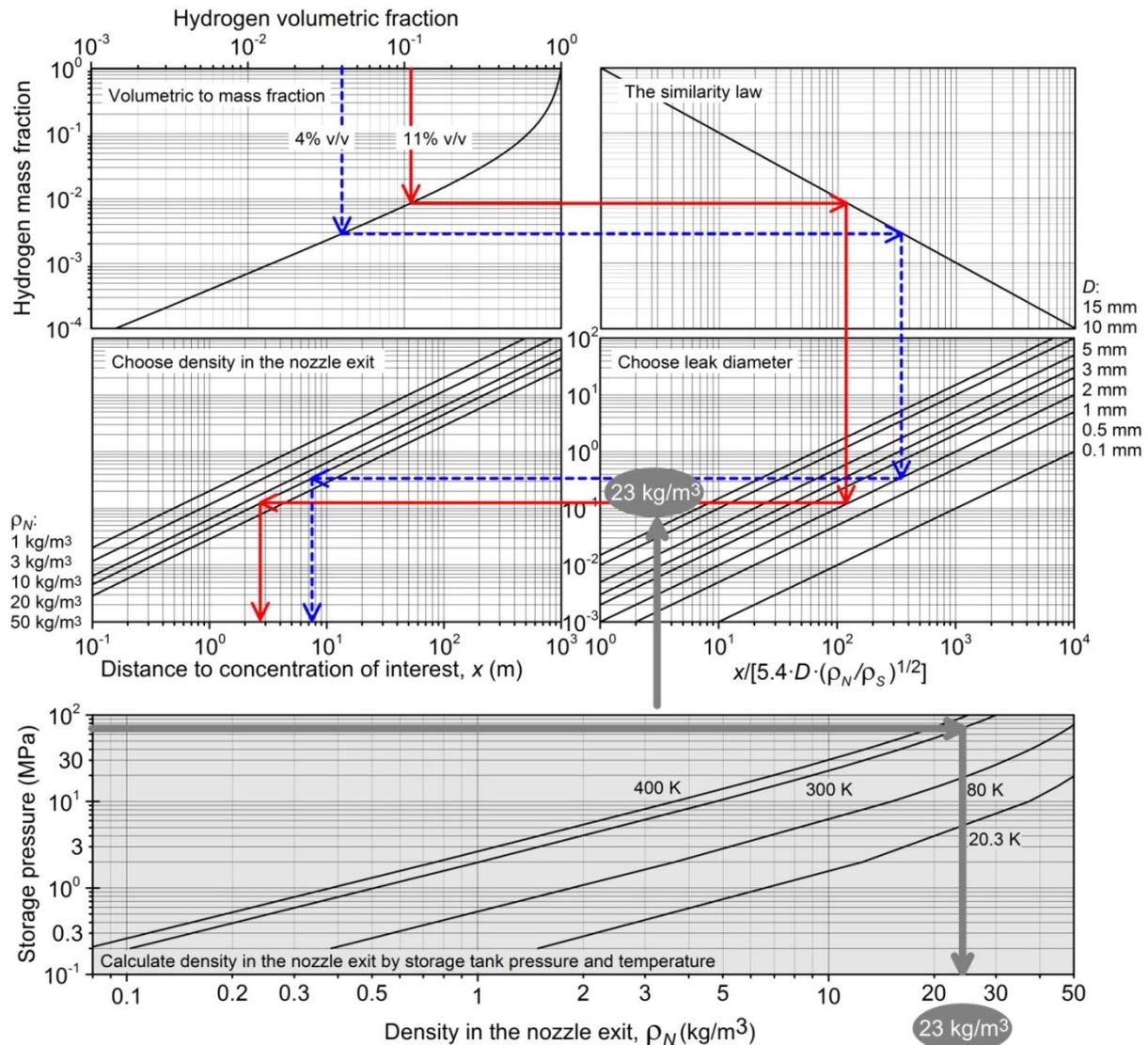


Figure 6. Nomogramme permettant de calculer la décroissance de la concentration dans les jets non enflammés [1].

En utilisant l'équation (2) de la loi de similitude avec une densité d'hydrogène plus précise au niveau de la buse, calculée à l'aide de la *théorie des jets sous-détendus* ($23,95 \text{ kg/m}^3$), et une densité d'air de $1,205 \text{ kg/m}^3$ (dans des conditions normales de température et de pression), on obtient une distance de 8,36 m pour 4 % en volume d'hydrogène dans l'air. La marge d'erreur des calculs graphiques est acceptable car elle est inférieure à 10 %.

Tâche destinée aux stagiaires : à l'aide du nomogramme de la Figure 6, évaluez la distance jusqu'à une concentration de 11 % en volume d'hydrogène dans l'air en supposant une même

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

pression de stockage de 70 MPa, une même température de stockage de 300 K et un même diamètre physique de buse de 1 mm (correspondant à l'emplacement moyen de la pointe de la flamme).

Le « modèle de paramètres des jets » de l'e-Laboratoire permet d'évaluer rapidement et simplement la densité du gaz dans la buse en renseignant les données suivantes : la pression dans le réservoir, la température dans le réservoir, le diamètre de l'orifice et la pression ambiante.

La loi de similitude pour les *jets sous-détendus* et le nomogramme sont des outils fondés sur les performances qui permettent de calculer les distances de sécurité liées aux libérations non enflammées. Ils constituent une alternative aux codes normatifs. Par exemple, le Code international de lutte contre l'incendie (2006) contient un tableau des distances prescrites entre un système d'hydrogène et diverses cibles potentielles, y compris l'admission d'air d'un bâtiment [15]. Toutefois, ce code ne fournit ni n'exige aucune information sur les paramètres de stockage de l'hydrogène (pression et température) ou sur la taille de fuite du système. Il s'agit d'un exemple d'approche normative archaïque qui va à l'encontre des exigences modernes des codes et des normes fondés sur les performances [1].

Par rapport au Code international de lutte contre l'incendie [15] de 2010, la norme NFPA 55 [16] de 2010 a fait un pas en avant en présentant un système de 4 équations permettant de calculer les distances jusqu'à la concentration axiale de 4 % en volume d'hydrogène dans l'air. Molkov [1] a relevé deux points faibles dans cette norme. Pour que les intervenants puissent utiliser plus simplement la méthode, chacune des 4 équations est assignée à une gamme de pressions assez large. Cela aboutit à une sur-prédiction ou une sous-prédiction « programmée » de la distance en fonction de la pression de stockage. Cependant, le calcul de la distance d'après la norme NFPA 55 [16] présente un inconvénient encore plus grave : l'utilisation d'une taille de fuite de seulement 3 % de la surface d'écoulement du tuyau (ce choix est fondé sur les fréquences de fuite d'autres gaz disponibles dans l'industrie) [1]. En effet, la loi de similitude stipule que pour une même densité d'hydrogène à la sortie de la buse ρ_N , c'est-à-dire pour une même pression de stockage, la distance de sécurité est directement proportionnelle au diamètre de fuite. Dans la norme NFPA 55 [16], le choix discutable d'une taille de fuite équivalant à 3 % de la surface de la section transversale du tuyau entraîne ainsi la diminution « prescrite » de la distance par l'inverse de la racine carrée de 0,03, c'est-à-dire de 5,77 fois. En cas de rupture totale d'un tuyau d'hydrogène, il est clair que les conséquences pourraient être dramatiques si cette approche de « 3 % » était largement utilisée et mise en œuvre par les organismes de réglementation. Les approches fondées sur les risques ne peuvent pas compromettre la conception d'ingénierie fondée sur la science. Les alternatives à cette réduction « forcée » de la distance de sécurité sont la conception des systèmes d'hydrogène relevant de l'ingénierie de la sécurité, par exemple la réduction de la pression dans le tuyau lorsque cela s'avère possible et la réduction du diamètre du tuyau à la taille minimale requise pour des raisons technologiques et/ou le remplacement d'un grand tuyau par un certain nombre de tuyaux plus

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

petits, l'utilisation de dispositifs de décompression dotés de caractéristiques de sécurité améliorées, etc. [1].

Nous pouvons en conclure que la loi de similitude peut être utilisée pour calculer la distance de sécurité plus précisément que ne le permettent les codes et normes actuellement disponibles. Fondée sur des études scientifiques, cette méthode peut tenir compte des frottements et des pertes mineures sur la trajectoire de fuite lorsque cela s'avère nécessaire. Enfin, l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène permet d'envisager librement le pire scénario vraisemblable, à savoir la rupture totale, plutôt que l'approche discutable de 3 % de la surface de la section transversale du tuyau, comme le suggèrent certains codes et normes [1].

6. Réduction de la distance de sécurité à partir d'une libération d'hydrogène

L'équation (4) montre que la distance de sécurité liée aux jets non enflammés x est proportionnelle au diamètre de la libération D et croît comme la racine carrée de la pression de stockage (densité ρ_N). En gardant cela à l'esprit, la principale exigence de sécurité liée aux libérations d'hydrogène non enflammées peut être formulée comme suit : *réduire le diamètre des tuyaux (qui correspond au diamètre de fuite pour le pire scénario vraisemblable) au minimum technologiquement possible*, conformément au principe ALARP (« aussi faible que raisonnablement possible ») ou ALARA (« aussi faible que raisonnablement réalisable ») qui est souvent utilisé dans le cadre de la réglementation et de la gestion des systèmes critiques pour la sécurité ainsi que des systèmes liés à la sécurité. Le même principe peut être appliqué au diamètre des dispositifs de décompression (DD) ou des dispositifs de décompression thermique (DDT) [2].

6.1 Quand un jet devient-il flottant ?

En fonction de l'effet de flottabilité, les jets peuvent être contrôlés par l'inertie, transitionnels ou contrôlés par la flottabilité, comme le montre la Figure 3. La distance de sécurité liée à une libération d'hydrogène non enflammée est plus élevée pour une fuite orientée horizontalement que diagonalement ou verticalement. Dans de nombreux cas, un jet vertical non enflammé ayant lieu à l'extérieur ne présente aucun danger pour les personnes et n'endommage pas les bâtiments ni les structures. Pour les intervenants, toutefois, il est important de savoir si une fuite est à l'origine contrôlée par l'inertie ou par la flottabilité, ou à quelle concentration en hydrogène l'écoulement passe d'un régime contrôlé par l'inertie à un régime contrôlé par la flottabilité pour le même jet (par exemple, en cas de fuites verticales dirigées vers le bas).

La technique présentée ci-dessous, qui permet de distinguer les écoulements contrôlés par l'inertie et par la flottabilité dans les jets détendus et sous-détendus, est fondée sur les travaux de Shevyakov et al. [17, 18] qui ont été réalisés avec des jets détendus uniquement. La Figure 7 montre, en coordonnées logarithmiques, la dépendance du rapport entre la distance et le diamètre de la buse x/D (en ordonnée) pour une concentration volumétrique donnée

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

d'hydrogène dans l'air en fonction du *nombre de Froude Fr* (en abscisse) dans sa forme classique :

$$Fr = U^2/gD \quad (5)$$

où U correspond à la vitesse à la sortie de la buse (sortie de la buse théorique pour les jets sous-détendus) en m/s, g correspond à l'accélération gravitationnelle (l'accélération standard de la gravité terrestre s'élève à $9,80665 \text{ m/s}^2$) et D correspond au diamètre de la buse (diamètre de sortie de la buse théorique pour les jets sous-détendus) en m.

Pour les jets sous-détendus de la Figure 7, les paramètres à utiliser dans la référence (5) - à savoir le diamètre de sortie de la buse théorique D et la vitesse à la sortie de la buse théorique U - ont été calculés à l'aide de la *théorie des jets sous-détendus* [11]. Dans les applications techniques, les jets détendus et sous-détendus obéissent tous deux à la même dépendance fonctionnelle avec une précision de 20 %.

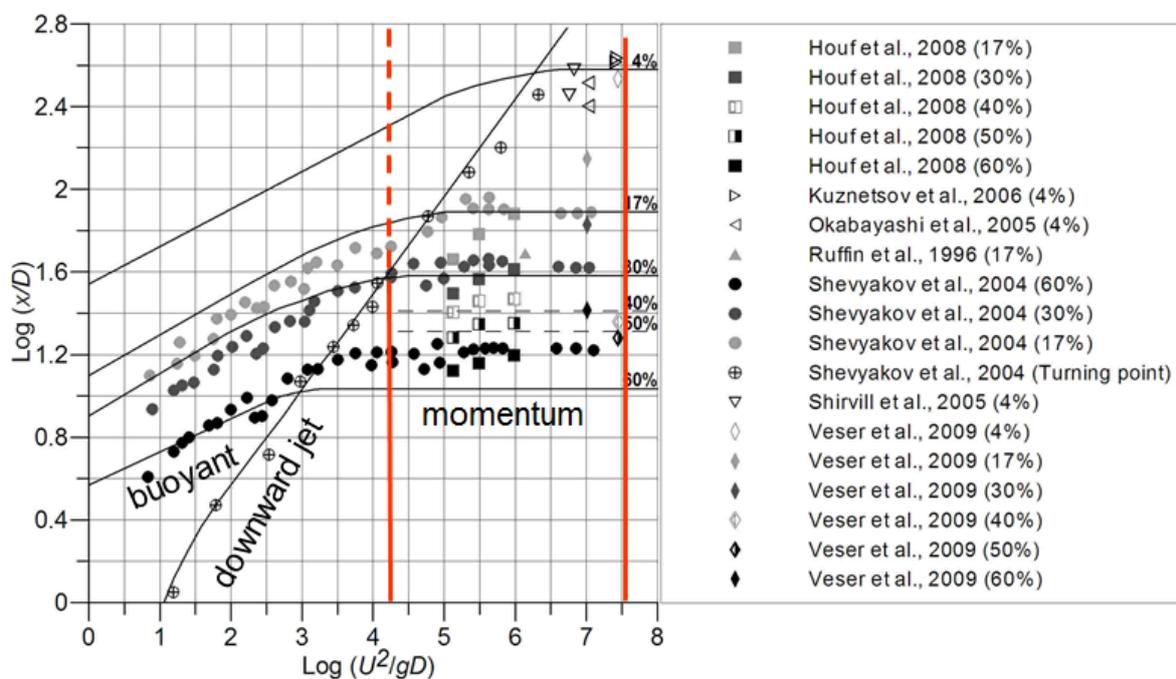


Figure 7. Dépendance du rapport entre la distance et le diamètre de la buse pour une concentration donnée d'hydrogène dans l'air en fonction du nombre de Froude [17, 18].

La Figure 7 présente cinq courbes théoriques (lignes pleines) et les données expérimentales de Shevyakov et de ses co-auteurs concernant les jets détendus [17, 18], ainsi que les données d'autres chercheurs concernant les jets sous-détendus. Dans le contexte des incidents et accidents liés à l'hydrogène, pratiquement tous les jets sous-détendus se trouveront dans le régime contrôlé par l'inertie, comme le montrent les essais employés pour valider la corrélation de la Figure 7. Quatre des cinq courbes théoriques du graphique sont liées à des concentrations en hydrogène de 4 %, 17 %, 30 % et 60 % en volume. Chacune de ces quatre courbes comporte une partie flottante ascendante et une partie inerte « en plateau » [1].

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Il est important de souligner que, lors de la transition entre la partie de la courbe contrôlée par la flottabilité et la partie contrôlée par l'inertie, le nombre de Froude (Fr) dépend de la concentration en hydrogène. Par exemple, à une concentration axiale en hydrogène égale à 60 % en volume, le jet demeure dans le régime contrôlé par l'inertie jusqu'à ce que la valeur $\text{Log}(Fr)$ soit supérieure à 3,5. En revanche, pour que le jet se trouve dans le régime contrôlé par l'inertie à l'endroit axial où la concentration en hydrogène chute à 4 % en volume (limite inférieure d'inflammabilité), le nombre de Froude à la sortie de la buse doit être beaucoup plus élevé, c'est-à-dire que la valeur $\text{Log}(Fr)$ doit être supérieure à 6,5 (plus élevée de trois ordres de grandeur) [1].

La cinquième courbe de la Figure 7, celle des « jets orientés vers le bas », est particulièrement intéressante pour les personnes appelées à prendre des décisions en cas d'accident. Cela donne, pour un jet dirigé verticalement vers le bas, une distance sans dimension entre la buse et le point d'inflexion où le jet change de direction, passant d'un écoulement vers le bas à un écoulement vers le haut. Pour calculer la distance jusqu'au point d'inflexion, il suffit de connaître le nombre de Froude au niveau de la buse (buse théorique). La cinquième courbe croise chacune des quatre autres courbes de la Figure 7 dans la zone de *transition entre un écoulement dominé par l'inertie et un écoulement contrôlé par la flottabilité*, comme prévu [1]. Pour utiliser la corrélation de la Figure 7, il convient de suivre les étapes suivantes :

1. Calculer le nombre de Froude à la sortie de la buse Fr et son logarithme. Utiliser la théorie des jets sous-détendus pour calculer le diamètre de sortie de la buse théorique et la vitesse à la sortie de la buse théorique des jets sous-détendus.
2. Tracer une ligne verticale ascendante à partir du point de l'axe des abscisses (horizontal) égal au logarithme du nombre de Froude calculé. Sur le graphique, l'intersection de cette ligne verticale avec la ligne des « jets orientés vers le bas » indique la concentration au-dessus de laquelle le jet est considéré comme étant dominé par l'inertie (ligne rouge continue) et en dessous de laquelle le jet est considéré comme étant contrôlé par la flottabilité (ligne rouge en pointillés).

Par exemple, si le nombre de Froude à la sortie d'un jet est $\text{Log}(Fr) = 4,25$, l'intersection de la ligne verticale avec la ligne des « jets orientés vers le bas » se situe à l'endroit de la courbe théorique correspondant à une concentration de 30 % en volume. Ainsi, le jet se trouve dans le régime dominé par l'inertie lorsque la concentration dans le jet est supérieure à 30 % en volume et devient flottant lorsque la concentration sur l'axe du jet est inférieure à 30 % en volume (plus en aval de la concentration axiale de 30 % en volume).

Cette technique est assez simple à utiliser et peut également s'avérer très utile pour les intervenants. Par exemple, la distance de sécurité associée à un jet horizontal peut être considérablement réduite car seule la longueur de la partie du jet dominée par l'inertie peut être considérée comme une indication de la distance de sécurité plutôt que la distance agrégée (les

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

parties du jet contrôlées par l'inertie et la flottabilité) jusqu'à la limite inférieure d'inflammabilité de 4 % en volume [1].

6.2 Pour un dispositif de décompression thermique, qu'est-ce qu'un diamètre sûr ?

La loi de similitude (2) est un outil simple et parfaitement adapté à l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène, tant pour les jets ronds détendus que sous-détendus. Penchons-nous sur le scénario suivant : un chariot élévateur à pile à combustible est stationné dans un entrepôt. Il est équipé d'un réservoir de stockage d'hydrogène muni d'un dispositif de décompression (DD). Calculons le diamètre que doit présenter le dispositif de décompression pour pouvoir libérer l'hydrogène vers le haut en toute sécurité à partir du système stockage embarqué à 35 MPa. Dans ce cas, nous souhaitons éviter qu'une couche inflammable ne se forme sous le plafond de l'entrepôt, qui se trouve à 10 m au-dessus du dispositif de décompression. Pour mener à bien cette stratégie de sécurité, la concentration sur l'axe du jet à une distance de 10 m doit être inférieure ou égale à 4 % en volume (la fraction de masse correspondante de l'hydrogène est de 0,00288). La densité de l'hydrogène à la sortie de la buse, calculée à l'aide de la théorie des jets sous-détendus pour une pression de stockage de 35 MPa, est la suivante : $\rho_N = 14,4 \text{ kg/m}^3$. Ainsi, le diamètre du dispositif de décompression peut être calculé, à partir de la loi de similitude (2), comme étant inférieur ou égal à 1,5 mm :

$$D = \frac{C_{ax}^m}{5.4} \sqrt{\frac{\rho_S}{\rho_N}} x = \frac{0.00288}{5.4} \sqrt{\frac{1.205}{14.4}} 10 = 0.0015m, \quad (6)$$

Pour finaliser cette stratégie de sécurité en vue de l'utilisation de chariots élévateurs à hydrogène dans l'entrepôt, il convient de déterminer le degré de résistance au feu requis du réservoir de stockage embarqué et d'effectuer des tests. En effet, le degré de résistance au feu doit être supérieur au temps de purge (c'est-à-dire le temps nécessaire pour vider le réservoir de stockage) du réservoir de stockage afin d'éviter toute défaillance catastrophique en cas d'incendie externe. Il est clair que l'utilisation d'un dispositif de décompression thermique de plus grand diamètre générerait un nuage inflammable ou un jet enflammé présentant des risques plus importants, par exemple une surpression dangereuse lors de l'inflammation retardée ou la déflagration du nuage initial, ainsi que les risques associés [1]. Les libérations d'hydrogène enflammées (ou jets enflammés) seront abordées dans un prochain cours.

7. Purge d'un réservoir de stockage d'hydrogène comprimé

La purge est un processus assimilé à la vidange du contenu d'un réservoir de stockage par le biais de l'orifice d'un dispositif de décompression thermique, de la ventilation ou d'une fuite. Le temps de purge dépend de la masse d'hydrogène stockée, du volume du réservoir, de la pression et du diamètre de l'orifice.

Par exemple, les Tableaux 2 et 3 indiquent le volume, la pression, le poids et le temps de purge jusqu'à la pression atmosphérique (en secondes) de l'hydrogène, dans le cadre du stockage

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

embarqué pour certains véhicules à pile à combustible de démonstration ou prototypes. Le temps de purge est le plus élevé pour le véhicule présentant le plus grand réservoir de stockage (véhicule 3, 156 L, 70 MPa). Pour les diamètres d'orifice de fuite typiques, compris entre 4 et 6 mm, le temps de purge varie de 124 secondes (un peu plus de 2 minutes) à 54 secondes (un peu moins de 1 minute) ; il s'agit donc d'un processus très rapide.

Tableau 2. Exemples de paramètres de stockage de l'hydrogène embarqué pour différents véhicules à pile à combustible

Véhicules	Fabricant	Modèle	Pression (MPa)	Volume (L)	Poids (kg)	Statut
1	Hyundai	Véhicule électrique hybride à pile à combustible Tucson	35	152	3,6	Démonstration
2	VW	Touran HyMotion	35	81	1,9	Prototype
3	Toyota	Véhicule hybride à pile à combustible avancé (2008)	70	156	6,2	Prototype
4	VW	Tiguan HyMotion	70	81	3,2	Test des véhicules

Tableau 3. Temps de purge adiabatique calculés pour différents diamètres de fuite des réservoirs de stockage embarqués des véhicules 1 à 4

Diamètre de fuite [mm]	Temps de purge du véhicule 1 (secondes)	Temps de purge du véhicule 2 (secondes)	Temps de purge du véhicule 3 (secondes)	Temps de purge du véhicule 4 (secondes)
2	427	226	502	260
3	189	100	222	115
4	105	56	124	64
5	67	35	79	41
6	46	24	54	28

La Figure 8 illustre la chute de pression à l'intérieur des réservoirs de stockage pendant la purge. Comme vous pouvez le constater, la pression du réservoir chute de manière considérable et atteint rapidement la pression atmosphérique.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

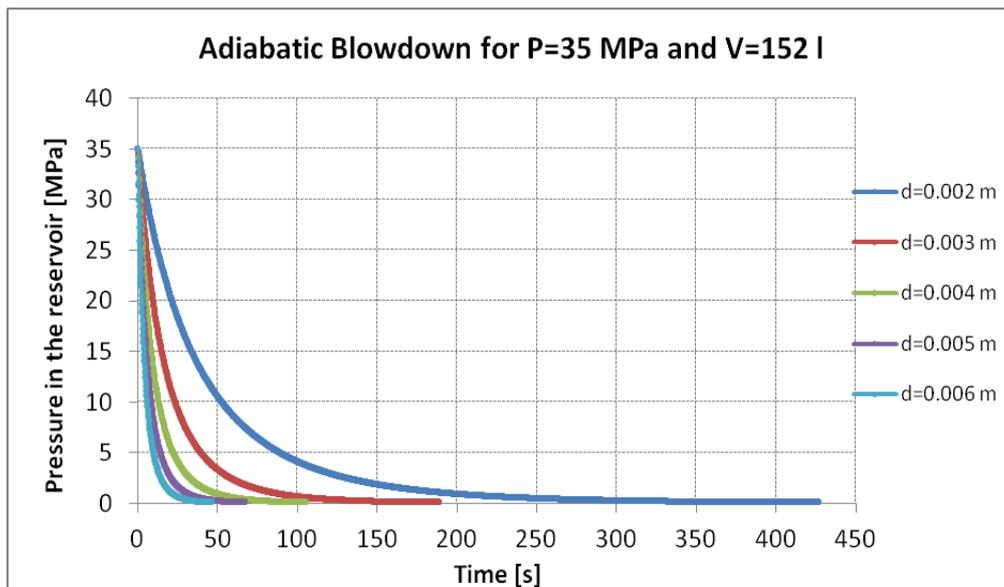


Figure 8. Chute de pression à l'intérieur d'un réservoir de stockage d'hydrogène en fonction du temps pour différents diamètres de fuite (véhicule 1).

Au sein du centre HySAFER de l'Université d'Ulster, Li et al. ont réalisé une étude de mécanique des fluides numérique portant sur les libérations d'hydrogène non enflammées depuis le système de stockage d'hydrogène embarqué d'une voiture à pile à combustible [19] en 2015. Cette étude s'est intéressée à un scénario d'accident impliquant une libération verticale d'hydrogène vers le bas depuis un dispositif de décompression thermique (DDT) situé sous une voiture à pile à combustible, à l'extérieur (c'est-à-dire à ciel ouvert). Une libération d'hydrogène non enflammée peut avoir lieu en raison du déclenchement inattendu d'un dispositif de décompression thermique défectueux, par exemple à la suite d'un grave accident de voiture. Les dispositifs de décompression thermique se trouvent généralement sous le véhicule à pile à combustible (Figure 8) et leurs événements sont orientés verticalement vers le bas, de sorte que la libération d'hydrogène entre en contact avec le sol [19]. L'hydrogène libéré peut former un nuage inflammable susceptible d'entraîner un incendie instantané.

Les dimensions de la berline type utilisée dans la référence [19] sont indiquées sur la Figure 9. Conformément aux spécifications de la Honda FCX [20], les auteurs ont supposé que le réservoir d'hydrogène embarqué était plein et présentait un volume de 171 litres. Deux pressions de stockage ont été envisagées : 35 et 70 MPa. Comme le montre la Figure 9, le dispositif de décompression thermique se trouve généralement près de la roue arrière, sous le véhicule, et son orifice mesure 4,2 mm de diamètre [21]. On suppose également que la pression et la température ambiantes s'élèvent respectivement à 1 atm et 20 °C et qu'il n'y a pas de vent dans l'environnement [19].

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

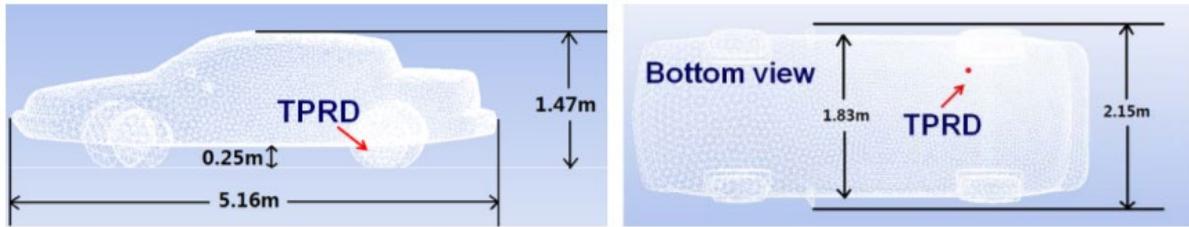
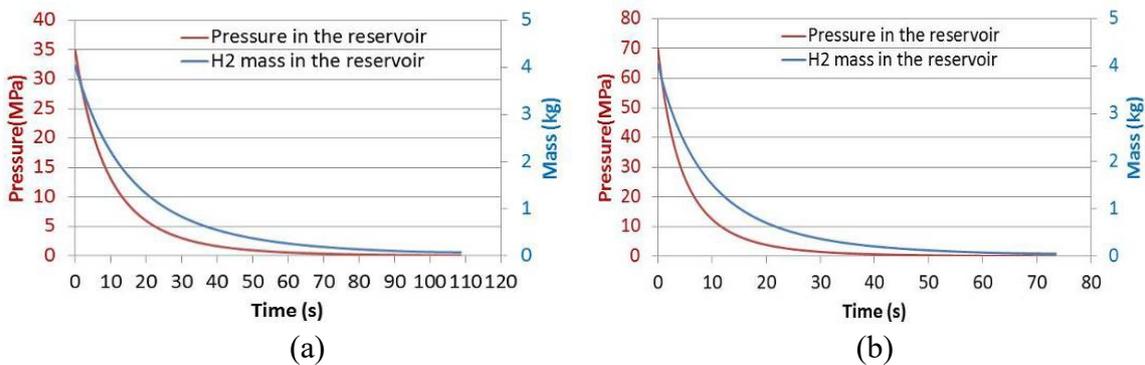


Figure 9. Géométrie d'une voiture à pile à combustible et emplacement du dispositif de décompression thermique [19].

Dans cette étude, la concentration en hydrogène de 4 % en volume, très prudente, constitue un critère de danger pour le grand public, tandis que la concentration de 8 % en volume représente un critère de danger pour les intervenants qui ne sont pas équipés de vêtements de protection thermique, par exemple les policiers et le personnel médical d'urgence. Pour les sapeurs-pompiers équipés d'une tenue de protection, le nuage inflammable d'hydrogène est inoffensif ; en effet, leur tenue les protège de tout éventuel incendie instantané d'hydrogène. Outre le critère de danger qu'elle constitue pour les personnes, cette concentration en hydrogène de 4 % en volume représente un critère d'endommagement pour l'admission d'air des bâtiments. Si le panache inflammable présentant une concentration en hydrogène de 4 % en volume atteint l'admission d'air d'un très haut bâtiment, les conséquences peuvent être dramatiques pour les occupants et la structure du bâtiment [19].

En conditions réelles, la libération d'hydrogène provenant d'un réservoir à haute pression n'est pas une libération constante mais un processus de purge, au cours duquel la pression diminue dans le réservoir jusqu'à ce qu'il soit vide. Le modèle de buse théorique mentionné précédemment peut être appliqué pour simuler la dynamique des pressions dans le réservoir de stockage d'hydrogène dans le cadre d'un jet sous-détendu. L'outil du Cyber Laboratory « Purge adiabatique du réservoir de stockage » a été utilisé. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 10. Pour les libérations provenant de l'orifice de 4,2 mm d'un réservoir de 171 L à 35 MPa, le temps total de purge est inférieur à 110 secondes (< 2 minutes) et le jet passe de sous-détendu à détendu à 85 secondes. Pour les libérations provenant de l'orifice de 4,2 mm à 70 MPa, à masse identique, le temps total de purge est inférieur à 75 secondes et le jet passe de sous-détendu à détendu à 58 secondes [19].



Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Figure 10. Valeurs de purge adiabatique (réduction de la pression et de la masse d'hydrogène) des réservoirs de stockage à 35 MPa (a) et 70 MPa (b) (diamètre de l'orifice : 4,2 mm) [19].

Comme le montre la Figure 11, pour les intervenants qui ne portent pas de vêtements de protection thermique, la distance de sécurité la plus longue à partir du point de libération s'élève à 8,8 m et à 10,5 m pour des pressions de stockage respectives de 35 MPa et de 70 MPa. Pour les libérations d'hydrogène stocké à 70 MPa, la distance de sécurité est près de 20 % plus élevée que pour les libérations d'hydrogène stocké à 35 MPa. Dans les deux cas, les plus grandes tailles de panaches d'hydrogène de 8 % en volume à proximité du sol ont été formées 5,5 secondes après l'ouverture du dispositif de décompression thermique. Par la suite, les panaches rétrécissent et les distances de sécurité diminuent.

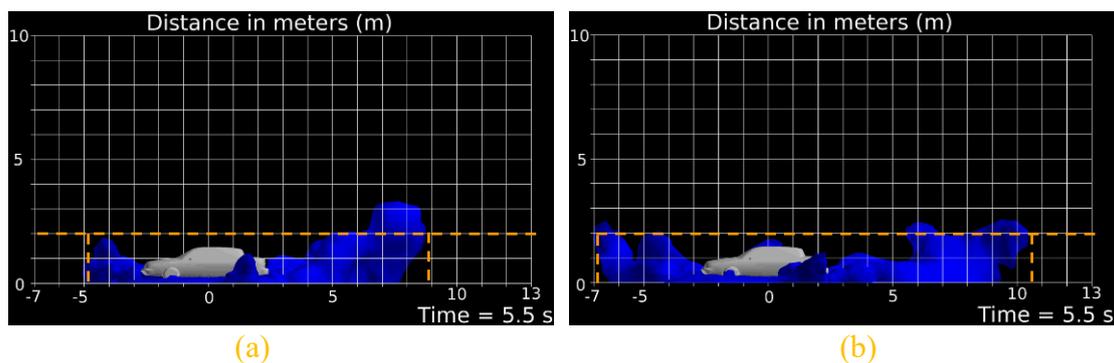


Figure 11. Panaches d'hydrogène de 8 % en volume observés 5,5 secondes après le début de la libération : a) pour une pression de stockage de 35 MPa, b) pour une pression de stockage de 70 MPa (la distance de sécurité la plus longue s'allonge en supposant que la hauteur des intervenants ne dépasse pas 2 m) [19].

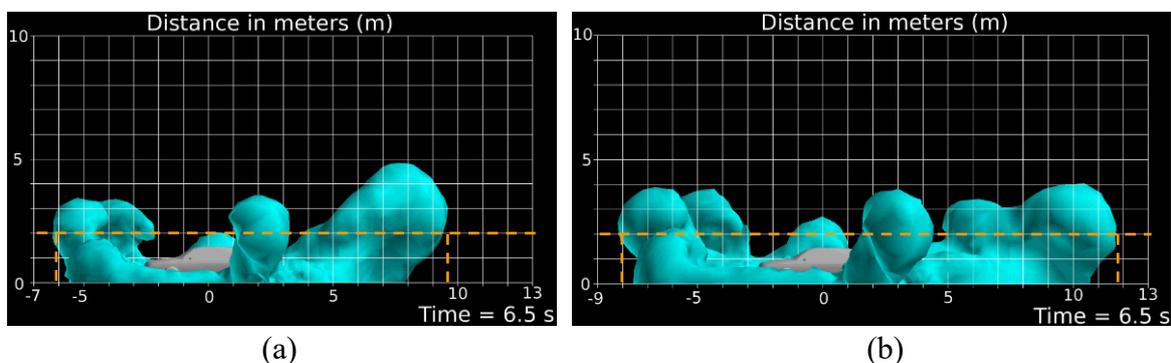


Figure 12. Panaches d'hydrogène de 4 % en volume observés 6,5 secondes après le début de la libération : a) pour une pression de stockage de 35 MPa, b) pour une pression de stockage de 70 MPa (la distance de sécurité la plus longue s'allonge en supposant que la hauteur des intervenants ne dépasse pas 2 m) [19].

Comme le montre la Figure 12, pour le grand public au sol, les distances de sécurité les plus longues pour les libérations ayant lieu à 35 et 70 MPa s'élèvent respectivement à 9,4 et 11,8 m. Dans les deux cas, les plus grands panaches d'hydrogène de 4 % en volume à proximité du sol ont été observés 6,5 secondes après l'activation du dispositif de décompression thermique. Par la suite, les panaches rétrécissent et les distances de sécurité diminuent. La Figure 12 ne

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

représente que des panaches de 4 % en volume pour une taille inférieure à 2 m (lignes de seuil orange). Les plus grands panaches inflammables pour l'ensemble du domaine sont illustrés sur la Figure 13. Les distances de sécurité alentour peuvent en être déduites [19].

On peut observer sur la Figure 13 que, pour l'admission d'air d'un bâtiment, les distances de sécurité les plus longues sont égales à 10,7 m et 12,3 m pour des libérations ayant respectivement lieu à 35 MPa et 70 MPa. Pour les libérations ayant lieu à 70 MPa, la distance de sécurité augmente de 15 % par rapport aux libérations ayant lieu à 35 MPa. Dans les deux cas, les plus grands panaches d'hydrogène de 4 % en volume apparaissent 9,5 secondes après l'ouverture du dispositif de décompression thermique. Par la suite, les panaches rétrécissent et les distances de sécurité diminuent. Si l'on compare les distances de sécurité de ces jets projetés aux distances de sécurité calculées pour les jets libres (27,4 m pour une pression de stockage de 35 MPa et 35,4 m pour une pression de stockage de 70 MPa), les résultats traduisent une importante réduction de plus de 60 % et 65 % pour les libérations ayant respectivement lieu à 35 MPa et 70 MPa, comme le montre la Figure 13.

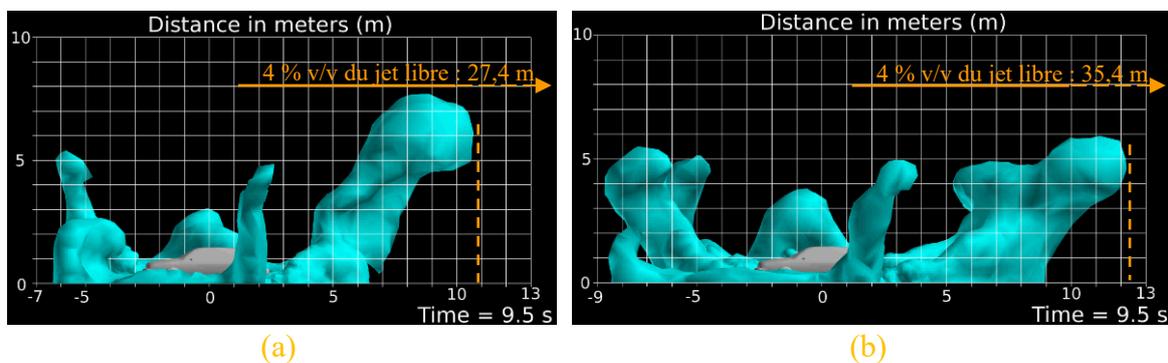


Figure 13. Étendue des panaches d'hydrogène de 4 % en volume pour les libérations non enflammées des réservoirs de stockage : a) mis sous pression à 35 MPa, b) mis sous pression à 70 MPa [19].

Pour résumer, l'étude fondée sur la mécanique des fluides numérique menée par Li et al. [19] a démontré que :

- en cas de libérations d'hydrogène non enflammées provenant de réservoirs de stockage mis sous pression à 35 MPa et 70 MPa, les distances de sécurité les plus longues apparaissent dans les 10 secondes suivant l'ouverture du dispositif de décompression thermique et la durée des risques associés à la libération d'hydrogène est inférieure à 2 minutes ;
- en cas de libérations d'hydrogène non enflammées provenant d'un dispositif de décompression thermique orienté verticalement vers le bas sous une voiture à pile à combustible, les distances de sécurité déterministes sont nettement plus courtes que celles des jets libres ;

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

- pour le grand public et les intervenants qui ne sont pas équipés de vêtements de protection thermique, la distance de sécurité maximale en cas de libération non enflammée est comprise entre 8 et 12 m selon la pression de stockage ;
- pour garantir que la concentration en hydrogène est toujours inférieure à la limite inférieure d'inflammabilité (4 % en volume) à l'emplacement d'admission d'air des bâtiments, la distance de sécurité doit être d'au moins 11 m pour les libérations à 35 MPa et de 13 m pour les libérations à 70 MPa.

Les libérations d'hydrogène non enflammées à l'intérieur des bâtiments seront abordées ultérieurement, dans le cours intitulé « Espaces confinés ».

En règle générale, la principale stratégie de sécurité face à une fuite d'hydrogène consiste à limiter son débit massique, par exemple en réduisant la taille de toute fuite potentielle en conservant un diamètre de conduite le plus petit possible, et à la « laisser sortir » pour empêcher l'accumulation d'hydrogène à un niveau dangereux lorsqu'un mélange hydrogène-air inflammable présente des risques inacceptables [1]. La prévention et l'atténuation des fuites d'hydrogène non enflammées sont abordées ci-après.

8. Prévention des fuites d'hydrogène

Avant de détecter et de limiter les libérations d'hydrogène, les étapes initiales consistent à prendre des mesures préventives afin de contrôler les risques associés. Les mesures de prévention sont des mesures de sécurité susceptibles d'agir sur les causes combinées d'un événement dangereux pour l'empêcher de se produire. Ces mesures réduisent la probabilité de l'événement. Elles visent à prévenir la perte d'étanchéité et la défaillance de l'équipement. Il s'agit notamment des mesures suivantes :

- Empêcher la formation d'atmosphères inflammables grâce à une conception des systèmes de PCH intrinsèquement plus sûre ;
- Sélectionner minutieusement les matériaux des systèmes de PCH afin d'éviter la fragilisation par l'hydrogène ;
- Minimiser la quantité d'hydrogène (et potentiellement d'oxygène) stockée et impliquée dans le fonctionnement ;
- Valider l'équipement ;
- Assurer la protection physique ;
- Vérifier régulièrement l'étanchéité ;
- Inspecter régulièrement l'équipement.

Les mesures de prévention liées à l'intégrité mécanique des systèmes d'hydrogène impliquent :

- La validation de la conception de l'équipement par le biais de tests de performance ;
- Des contrôles réguliers de l'équipement suite à son installation.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

À la fin de la durée de vie spécifiée, l'équipement peut être mis hors service [22]. Les tests et la validation de la conception visent à prouver que l'équipement est adapté à l'usage prévu. Il est également possible d'effectuer des tests de résistance et d'endurance. Les tests de résistance sont des tests de base (par exemple, test de pression hydraulique) au cours desquels toutes les caractéristiques pertinentes du système sont testées. Les tests d'endurance sont plus élaborés : le système est soumis à une charge cyclique et le temps qui s'écoule jusqu'à sa défaillance caractérise son endurance. Un facteur permet de déterminer la durée de vie, par exemple une exigence de résistance à 50 000 cycles de test pour une durée de vie spécifiée de 10 000 cycles [22].

Les équipements soumis à des tests d'intégrité mécanique sont énumérés ci-après :

- Réservoirs d'hydrogène gazeux ;
- Vannes des réservoirs ;
- Flexibles ;
- Dispositifs de raccordement rapide.

La conception intrinsèquement plus sûre est une approche qui se concentre sur la réduction ou l'élimination des risques associés au produit ou au processus. Voyons comment la sécurité d'un système de pile à combustible (PC) pourrait être améliorée en réduisant les risques sans pour autant interférer avec la technologie elle-même. Malheureusement, les systèmes de piles à combustible actuels sont souvent conçus avec des tuyaux de 5 à 15 mm de diamètre et des pressions de 0,5 à 1,5 MPa, sans tenir compte des risques. Le débit massique à travers un orifice de 5 mm de diamètre à une pression de stockage de 0,5 MPa peut être calculé à l'aide de la *théorie des jets sous-détendus* ; il s'élève à environ 6 g/s. Pour un tuyau de 15 mm de diamètre et une pression de 1,5 MPa, le débit massique s'élève à 170 g/s [1].

Estimons à présent le débit massique d'un système de pile à combustible de 50 kW, qui fournit de l'énergie à de grandes installations telles que des hôtels, des hôpitaux, des immeubles de bureaux et des logements collectifs. En supposant que le rendement électrique d'une pile à combustible est de 45 % et que la chaleur de réaction supérieure (combustion) de l'hydrogène avec l'air s'élève à $[(286,1 \text{ kJ/mol})/(2,016 \text{ g/mol})] = 141,92 \text{ kJ/g}$, le débit massique de la pile à combustible fonctionnant à puissance maximale peut être calculé comme suit : $(50 \text{ kW})/0,45/(141,92 \text{ kJ/g}) = 0,78 \text{ g/s}$. Par exemple, ce débit massique peut être assuré, à une pression de 0,5 MPa, à travers un limiteur du système de stockage ou de tuyauterie présentant un orifice de seulement 1,8 mm de diamètre, ou, à une pression de 0,2 MPa, à travers un orifice d'environ 2,9 mm de diamètre [1].

Comme indiqué précédemment, la distance de sécurité liée à une libération non enflammée est proportionnelle au diamètre de la buse et à la racine carrée de la pression de stockage. Ainsi, la diminution du diamètre du tuyau de 15 à 2,9 mm et la réduction de la pression de 1,5 à 0,2 MPa peuvent réduire la distance de sécurité de plus de 14 fois [1].

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Il est possible de procéder à une analyse plus approfondie afin de comparer les distances de sécurité de chacune de ces deux options :

- option 1 - pression de 0,5 MPa et tuyau de 1,8 mm de diamètre ;
- option 2 - pression de 0,2 MPa et tuyau de 2,9 mm de diamètre.

En cas de rupture totale, le rapport des distances de sécurité liées aux libérations non enflammées peut être estimé à 0,98 pour l'option 1 et l'option 2 ; cela signifie que les distances sont pratiquement identiques. Ces exemples démontrent clairement les avantages d'une conception de la sécurité des systèmes de piles à combustible et à hydrogène fondée sur la science, qui permet de réduire considérablement les distances de sécurité sans pour autant affecter les paramètres de performance des piles à combustible [1].

9. Mesures d'atténuation des libérations non enflammées

Une fois que les mesures de prévention appropriées ont été prises, on peut envisager de prendre également des mesures de détection et d'atténuation. Les mesures de sécurité visant à atténuer ou à réduire la gravité des conséquences d'éventuels événements dangereux sont appelées mesures d'atténuation [22]. Pour atténuer le risque, il convient de réduire autant que possible le nombre de personnes exposées et de prévoir un dispositif de sécurité, de suppression ou de confinement des explosions. Pour détecter une fuite, il est possible d'utiliser des capteurs de gaz, le cas échéant. Les débitmètres, les détecteurs IR, etc. peuvent également s'avérer utiles. Certaines mesures d'atténuation sont énumérées ci-dessous [22, 23] :

- réduire l'ampleur de la fuite, par exemple en utilisant des limiteurs de débit d'hydrogène ;
- isoler l'hydrogène des oxydants, des matières dangereuses et des équipements dangereux ;
- utiliser des alarmes et/ou des dispositifs d'avertissement (y compris des capteurs d'hydrogène et des détecteurs d'incendie) ;
- utiliser des dispositifs et des systèmes d'arrêt ;
- identifier et, si possible, séparer ou éliminer les sources d'inflammation potentielles ;
- prévenir la formation d'atmosphères inflammables, par exemple par le biais de la ventilation (naturelle et active) ;
- élever les systèmes d'hydrogène, utiliser des débitmètres, etc. ;
- utiliser des emplacements extérieurs, dans la mesure du possible ;
- éviter l'encombrement ;
- mettre en place des distances de sécurité ;

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

- adopter de bonnes pratiques d'entretien, par exemple en veillant à ce que les voies d'accès et d'évacuation restent dégagées et à ce que les systèmes d'hydrogène soient exempts de mauvaises herbes et d'autres débris ;
- mettre en place un plan d'intervention d'urgence.

10. Détection des fuites d'hydrogène

L'hydrogène étant incolore et inodore, les capteurs constituent des équipements de sécurité essentiels pour assurer la sécurité des stations de ravitaillement et autres installations. Ajouter une substance odorante à l'hydrogène faciliterait la détection des petites fuites. Dans la plupart des cas, cela n'est toutefois pas possible en raison du risque d'empoisonnement du catalyseur très coûteux présent dans les piles à combustible. Les détecteurs/capteurs peuvent être utilisés pour détecter les libérations d'hydrogène, pour arrêter automatiquement les systèmes, pour activer les alarmes ainsi que pour avertir les intervenants. Dans le monde entier, les capteurs d'hydrogène font l'objet de recherches continues.

Les critères suivants sont utilisés pour sélectionner les capteurs d'hydrogène :

- la durabilité et la fiabilité ;
- la sensibilité à la contamination croisée, par exemple par des hydrocarbures ;
- la sensibilité à l'humidité ;
- le temps de réaction ;
- la probabilité de résultats faussement positifs ;
- la sensibilité aux températures extrêmes ;
- les exigences en matière d'entretien ;
- la plage de mesure ;
- la précision.

Les domaines d'intérêt du Bureau américain des technologies de piles à combustible sont résumés dans le Plan pluriannuel de recherche, de développement et de démonstration sur les technologies de l'hydrogène, des piles à combustible et des infrastructures (ci-après le Plan pluriannuel), qui a été publié en 2007 [24] et mis à jour en 2012 [25]. Une liste restreinte de paramètres critiques et de spécifications cibles liés aux capteurs d'hydrogène a été établie en 2007. Le tableau récapitulant ces paramètres et les spécifications correspondantes est reproduit sur la Figure 14. Le Plan pluriannuel 2012 [25] comporte un tableau presque identique.

Table 3.8.2. Targets for Hydrogen Safety Sensor R&D
<ul style="list-style-type: none">• Measurement Range: 0.1%-10%• Operating Temperature: -30 to 80°C• Response Time: under one second• Accuracy: 5% of full scale• Gas environment: ambient air, 10%-98% relative humidity range• Lifetime: 10 years• Interference resistant (e.g., hydrocarbons)

Figure 14. Objectifs des capteurs d'hydrogène définis par le Ministère américain de l'énergie [26].

Il est également important de savoir que, dans les technologies de sécurité de l'hydrogène, les capteurs ne constituent pas une stratégie de détection complète en raison de la flottabilité et de la diffusivité de l'hydrogène. Par exemple, un capteur d'hydrogène sera d'une faible utilité dans un grand local ou à l'extérieur. La disposition des capteurs doit être soigneusement étudiée et des outils relevant de la mécanique des fluides numérique peuvent être utilisés pour simuler des scénarios de fuite et donner une idée du positionnement des capteurs. Les détecteurs fixes et les détecteurs personnels/portatifs sont tous deux nécessaires pour protéger le personnel et les installations.

Les emplacements suggérés des capteurs d'hydrogène sont présentés ci-dessous :

- les endroits où des fuites ou des déversements d'hydrogène sont possibles ;
- les raccords d'hydrogène qui sont régulièrement ouverts (par exemple, les orifices de ravitaillement en hydrogène) ;
- les endroits où l'hydrogène pourrait s'accumuler ;
- les conduites d'admission d'air du bâtiment, si de l'hydrogène risque d'être transporté dans le bâtiment ;
- les conduites d'évacuation du bâtiment, si de l'hydrogène risque d'être libéré à l'intérieur du bâtiment.

Il est également obligatoire d'installer des capteurs d'hydrogène sur les véhicules à pile à combustible afin de signaler les fuites potentielles. Sur la Figure 15, les emplacements des

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

détecteurs d'hydrogène sur les véhicules électriques à pile à combustible sont indiqués par des points bleus. Il s'agit notamment des éléments suivants [27] :

- tuyau d'échappement (contrôle des processus) ;
- habitacle (sécurité) ;
- moteur (sécurité) ;
- bloc de piles à combustible (sécurité).

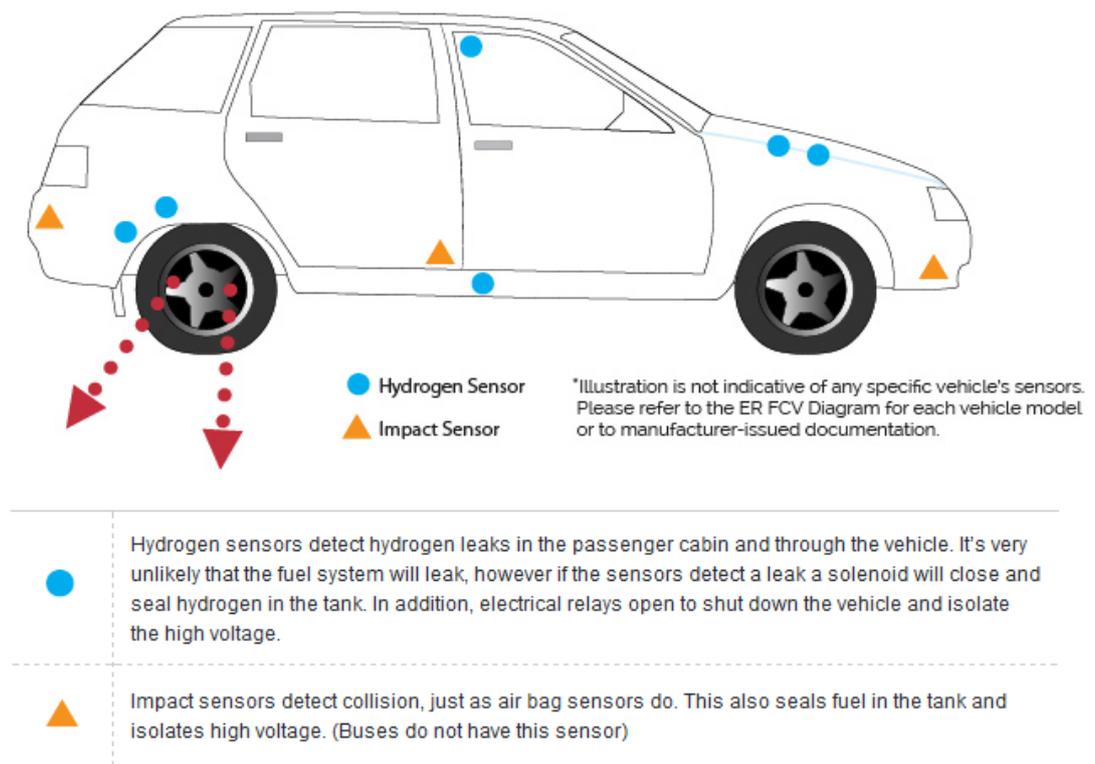


Figure 15. Emplacement possible des capteurs d'hydrogène dans un véhicule électrique à pile à combustible [27].

Le niveau de concentration couramment utilisé pour l'alarme principale s'élève à 1 % en volume d'hydrogène dans l'air, ce qui équivaut à 25 % de la limite inférieure d'inflammabilité. Ce niveau doit normalement laisser suffisamment de temps pour réagir de manière appropriée, par exemple en arrêtant le système, en évacuant le personnel ou en prenant d'autres mesures adéquates, le cas échéant. Il est possible d'émettre un avertissement au préalable. Pour atteindre toutes les spécifications cibles, plusieurs plateformes de capteurs sont nécessaires. Pour obtenir les meilleurs résultats possible, il faut utiliser une combinaison de plateformes de capteurs.

Les différents types de capteurs/détecteurs d'hydrogène disponibles dans le commerce sont les suivants :

- les détecteurs électrochimiques ;
- les détecteurs d'oxydes métalliques ;

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

- les détecteurs de conductivité thermique ;
- les détecteurs de gaz à effet de champ ;
- les couches minces de palladium basées sur la résistance ;
- les détecteurs catalytiques ;
- les systèmes micro-électromécaniques (MEMS) ;
- les dispositifs optiques ;
- d'autres recherches sont en cours.

Lors du choix des détecteurs, les facteurs suivants doivent être pris en compte [28] :

- la précision (1 à 10 %) ;
- la fiabilité ;
- la maintenabilité ;
- l'étalonnage ;
- les limites de détection (supérieure et inférieure) ;
- le temps de réaction (< 10 s) ;
- la récupération ou la non-récupération dans les temps ;
- la longue durée de vie (plus de 5 ans) ;
- la faible consommation d'énergie (< 10 MW) ;
- la facilité d'intégration du système.

En 2009, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS, France) a mené un programme d'essais dans le cadre du projet HYPER 2008 [29]. Ce projet était fondé sur certaines parties de la norme internationale CEI 61779-1&4, 1998 [30] et visait à évaluer les performances des détecteurs d'hydrogène disponibles dans le commerce. Ces dispositifs étaient de type électrochimique et de type catalytique, à savoir les deux types les plus utilisés dans l'industrie. Le capteur catalytique réagissait 5 fois plus vite que le capteur électrochimique aux expositions soudaines à l'hydrogène. Toutefois, le temps de réaction était d'environ 10 secondes pour le capteur catalytique et d'environ 50 secondes pour le capteur électrochimique. Ces chiffres s'appliquent également au temps de reprise après sinistre. Dans de nombreux cas concrets, ce temps n'est guère acceptable [1].

Suite à une exposition prolongée à l'hydrogène, les détecteurs catalytiques étudiés dans le cadre du projet HYPER étaient également susceptibles de perdre leur sensibilité et de dériver du point zéro. Cela souligne la nécessité d'étalonner régulièrement ces dispositifs. Pour une teneur en hydrogène constante, un taux d'humidité plus élevé a eu tendance à augmenter les relevés du détecteur catalytique. Le détecteur catalytique était très sensible à la présence de monoxyde de

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

carbone (CO), mais l'interférence n'était que temporaire. Cela signifie que lorsque l'exposition au CO a cessé, le détecteur s'est comporté de manière habituelle [1].

Dans le cadre du projet HYPER, des recherches ont été menées au sein du Centre commun de recherche, de l'organisation américaine Institute for Energy et de la Commission européenne. Elles ont démontré que le temps de réaction du capteur électrochimique face à une exposition à l'hydrogène de concentration connue s'allongeait lorsque le débit de gaz diminuait ; il peut en effet être deux fois plus long lorsque le débit passe de 100 à 30 ml/min. Cette constatation est particulièrement importante lorsque le capteur est destiné à contrôler la formation d'une atmosphère explosive dans un boîtier à pile à combustible [1].

Les capteurs catalytiques plus rapides posent un autre problème, sur lequel la documentation disponible ne s'est pas encore suffisamment penchée. Il s'agit du risque d'inflammation des mélanges hydrogène-air à forte concentration en hydrogène induit par le capteur. Des recombineurs ont déjà entraîné l'inflammation de mélanges hydrogène-air à forte teneur en hydrogène [31].

Pour détecter la présence d'hydrogène, différentes méthodes et différents types de capteurs sont disponibles dans le commerce [23]. Bon nombre de ces détecteurs peuvent être utilisés dans les systèmes d'avertissement et d'exploitation automatiques. Reportez-vous par exemple à la norme ISO 26142:2010 [32] pour obtenir de plus amples informations sur les systèmes stationnaires.

11. Outils pertinents de l'e-Laboratoire

Le cours 1 a permis de présenter l'e-Laboratoire. Les utilisateurs doivent se connecter à l'e-Laboratoire à l'adresse <https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory/> et sélectionner les outils appropriés dans la liste. Dans cette section, le « Modèle de paramètres des jets », la « Loi de similitude relative à la décroissance de la concentration et à la distance de sécurité » et le « Calcul de la flottabilité » ont été abordés de manière approfondie.

11.1 Modèle de paramètres des jets

Ce modèle décrit les paramètres des jets détendus ou sous-détendus. La Figure 16 représente un schéma simple d'un jet « détendu » (lignes rouges) et d'un jet « sous-détendu » (lignes noires), en comparaison avec la Figure 4.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

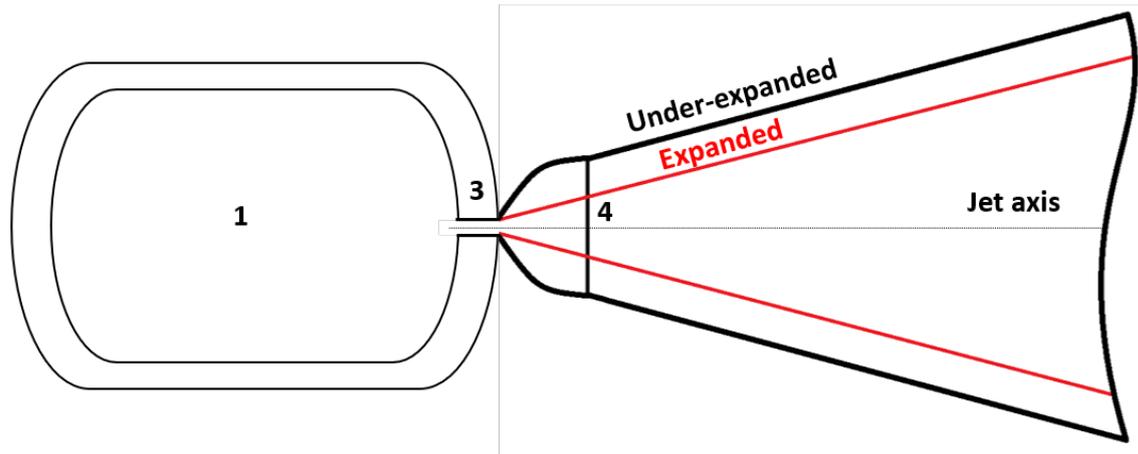


Figure 16. Schéma simple d'un jet « détendu » (lignes rouges) et d'un jet « sous-détendu » (lignes noires).

1 - Réservoir (récipient à haute pression), 3 - Sortie de la buse ou de l'orifice (entrée théorique), 4 - Sortie de la buse ou de l'orifice théorique (où la pression et la vitesse sont respectivement égales à la pression ambiante et à la vitesse locale du son). Veuillez noter que la sortie 4 ne concerne que les jets sous-détendus.

Le rapport de pression critique est d'environ 1,9 pour le passage à l'écoulement sonique de l'hydrogène. Si le rapport de pression critique est inférieur à 1,9, l'écoulement est subsonique et détendu ; s'il est supérieur à 1,9, la vitesse de sortie reste localement sonique et le jet est sous-détendu. La pression de sortie est supérieure à la pression ambiante, de sorte que la détente jusqu'à la pression ambiante, p_{atm} , a lieu à l'extérieur de la buse réelle, en aval du disque de Mach ; il s'agit du diamètre de la buse « théorique » ou effective.

Le rapport de pression critique au niveau de la fuite, p^* , détermine si l'écoulement est subsonique ou sonique/supersonique.

$$p^* = \frac{p_1}{p_{atm}} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (6)$$

Par conséquent, différents systèmes d'équations doivent être résolus selon que l'écoulement est détendu ou sous-détendu. Les équations relatives aux jets sous-détendus sont détaillées dans la référence [11] de Molkov et reposent sur l'équation d'état d'Abel-Noble pour l'hydrogène, sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie, ainsi que sur l'hypothèse qu'à l'état (4) (appelé « diamètre de la buse effective »), la pression est égale à la pression ambiante et la vitesse est égale à la vitesse locale du son.

Le système d'équations des jets détendus utilise les relations de pression et de densité isentropiques.

Les paramètres d'entrée comprennent le diamètre de l'orifice d_3 , la pression ambiante p_4 , la pression de l'hydrogène dans le réservoir p_1 et la température de l'hydrogène dans le réservoir T_1 . Une fois les paramètres susmentionnés définis, on obtient les valeurs d'un ensemble de paramètres calculés, comme le montre le Tableau 4.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Tableau 4 Paramètres d'entrée et de sortie du modèle de paramètres des jets

Name	Symbol	Value	Unit
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
H2 pressure in reservoir	p_1	2.05e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	288	K
H2 density in reservoir	ρ_1	15.2366	kg/m ³
H2 density at orifice	ρ_3	9.48882	kg/m ³
Pressure in orifice	p_3	9.83938e+6	Pa
Velocity in orifice	V_3	1253	m/s
Temperature at the orifice	T_3	233	K
Diameter of effective nozzle exit	d_4	0.0942914	m
Density in effective nozzle exit	ρ_4	0.1025	kg/m ³
Velocity in effective nozzle exit	V_4	1178	m/s
Temperature in effective nozzle exit	T_4	239.501	K
Mass flow rate	\dot{m}	0.84318	kg/s

11.2 Loi de similitude relative à la décroissance de la concentration et à la distance de sécurité

Ce modèle permet de prédire la décroissance de la concentration axiale d'une fuite de gaz pour les jets subsoniques, soniques et supersoniques. La loi de similitude s'avère valable dans de nombreuses conditions, des jets détendus aux jets fortement sous-détendus. Le modèle est utilisé pour calculer les distances de sécurité en fonction de la taille du panache inflammable.

L'analyse des données expérimentales a démontré que les flammes les plus longues, et donc les plus dangereuses, pouvaient être formées à partir de jets sous-détendus. Dans cette optique, la loi de similitude [33] relative à la décroissance de la concentration axiale dans les jets ronds non enflammés, détendus et dominés par l'inertie, telle que suggérée par Chen et Rodi [34], a été élargie et validée pour les jets d'hydrogène sous-détendus [1].

L'équation mise en œuvre pour calculer la distance axiale entre la buse et une concentration en hydrogène donnée peut être formulée comme suit :

$$x = \frac{5.4 \times D}{C_{ax}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \quad (7)$$

où x correspond à la distance axiale par rapport à la buse, D correspond au diamètre de la buse, C_{ax} correspond à la fraction de masse de l'hydrogène à la distance axiale x , ρ_N correspond à la densité à la sortie de la buse et ρ_S correspond à la densité de l'air.

Lorsque l'on considère les jets sous-détendus, il convient de connaître la densité dans la buse ρ_N , (en fonction de la pression de stockage et des pertes sur la trajectoire de fuite). Cette densité est calculée à l'aide des « Paramètres des jets d'hydrogène », un outil d'ingénierie décrit à la Section 10.1. Pour les jets détendus, les calculs sont fondés sur les relations de pression et de densité isentropiques (ce système d'équations est expliqué de manière plus détaillée dans la

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

description de l'outil d'ingénierie « Longueur de flamme et distance de séparation des jets enflammés »).

Dans un jet non enflammé émanant de la même source de fuite, il existe une corrélation entre l'emplacement de la pointe des flammes-jets d'hydrogène et l'emplacement de trois différentes concentrations en hydrogène (8 %, 11 % et 16 %).

Cet outil d'ingénierie permet de calculer la distance axiale par rapport à la buse correspondant à l'emplacement de diverses concentrations en hydrogène présélectionnées, à savoir 4 %, 8 %, 11 %, 16 % et 29,5 % en volume, dans les jets non enflammés. Ce modèle permet également à l'utilisateur de choisir sa propre concentration aux fins de l'analyse, dans les limites d'inflammabilité de l'hydrogène comprises entre 4 % et 75 % en volume.

Le Tableau 5 donne un exemple de paramètres d'entrée et de sortie de cet outil et de valeurs afférentes.

Tableau 5 Paramètres d'entrée et de sortie de cet outil

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	3.5e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	293	K
Orifice diameter	d_3	0.005	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Axial distance from nozzle to 4% by vol. H2	$X_{4\%,H_2}$	32.6212	m
Axial distance from nozzle to 8% by vol. H2	$X_{8\%,H_2}$	15.6793	m
Axial distance from nozzle to 11% by vol. H2	$X_{11\%,H_2}$	11.0593	m
Axial distance from nozzle to 16% by vol. H2	$X_{16\%,H_2}$	7.20885	m
Axial distance from nozzle to 29.5% by vol. H2	$X_{29.5\%,H_2}$	3.33269	m
Axial distance from nozzle to ?% by vol. H2	$X_{?,H_2}$	5.50167	m

11.3 Calcul de la flottabilité

Cet outil montre l'effet de la diminution de la distance de sécurité due à la flottabilité dans les libérations non enflammées. Il permet de calculer la distance entre la buse de libération et la concentration à laquelle la libération passe d'un régime contrôlé par l'inertie à un régime contrôlé par la flottabilité, ainsi que la distance de sécurité jusqu'à une concentration de 4 % en volume d'hydrogène.

Les jets peuvent être répartis en trois types en fonction de l'effet de flottabilité. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** schématise ces trois types de jets pour un jet horizontal. Les jets entièrement contrôlés par l'inertie ne sont pas affectés par la flottabilité. Les jets entièrement contrôlés par la flottabilité passent rapidement d'une direction d'écoulement horizontale à verticale. Le troisième type de jets est transitionnel et comporte une partie dominée par l'inertie plus près de la buse et un écoulement contrôlé par la flottabilité plus en aval, lorsque la vitesse du jet diminue et que le diamètre augmente. Aux fins de l'ingénierie de

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

la sécurité de l'hydrogène, il est important de savoir quand a lieu cette transition. Cela influe directement sur la distance de séparation et donc sur la sécurité et les coûts du système ou de l'infrastructure d'hydrogène.

L'outil d'ingénierie présenté ici permet de qualifier un jet d'hydrogène (aussi bien détendu que sous-détendu) ou une partie de celui-ci comme étant contrôlé(e) par l'inertie, et le reste du jet en aval comme étant contrôlé par la flottabilité. Il s'appuie sur les travaux des références [17, 18] effectués sur des jets détendus. La dépendance du rapport entre la distance et le diamètre de la buse (x/D) en fonction du nombre de Froude (Fr), pour une concentration donnée d'hydrogène dans l'air, est exprimée par l'équation (5). Pour les jets sous-détendus, le diamètre de sortie de la buse théorique et la vitesse à la sortie de la buse théorique ont été calculés à l'aide de la théorie des jets sous-détendus [11]. Dans les applications techniques, les jets détendus et sous-détendus obéissent tous deux à la même dépendance fonctionnelle avec une précision de 20 %.

Cinq courbes théoriques (lignes continues) et des données expérimentales concernant les jets détendus [17, 18], ainsi que des données issues d'autres recherches concernant les jets sous-détendus, sont disponibles. Dans le contexte des incidents et accidents liés à l'hydrogène, pratiquement tous les jets sous-détendus se trouveront dans le régime contrôlé par l'inertie. Quatre des cinq courbes théoriques du graphique sont liées à des concentrations en hydrogène de 4 %, 17 %, 30 % et 60 % en volume. Chacune de ces quatre courbes comporte une partie flottante ascendante et une partie inerte « en plateau ».

Il est important de souligner que, lors de la transition entre la partie de la courbe contrôlée par la flottabilité et la partie contrôlée par l'inertie, le nombre de Froude dépend de la concentration en hydrogène. Par exemple, à une concentration axiale en hydrogène de 60 % en volume, le jet demeure dans le régime contrôlé par l'inertie jusqu'à ce que la valeur $\text{Log}(Fr)$ soit supérieure à 3,5. En revanche, pour que le jet se trouve dans le régime contrôlé par l'inertie à l'endroit axial où la concentration en hydrogène chute à 4 % en volume (limite inférieure d'inflammabilité), le nombre de Froude à la sortie de la buse doit être beaucoup plus élevé, c'est-à-dire que la valeur $\text{Log}(Fr)$ doit être supérieure à 6,5 (plus élevée de trois ordres de grandeur).

La courbe des « jets orientés vers le bas » est particulièrement intéressante vis-à-vis de l'ingénierie de la sécurité de l'hydrogène. Cela donne, pour un jet dirigé verticalement vers le bas, une distance sans dimension entre la buse et le point d'inflexion où le jet change de direction, passant d'un écoulement vers le bas à un écoulement vers le haut. Pour calculer la distance jusqu'au point d'inflexion, il suffit de connaître le nombre de Froude au niveau de la buse (buse théorique). La cinquième courbe croise chacune des quatre autres courbes dans la zone de transition entre un écoulement dominé par l'inertie et un écoulement contrôlé par la flottabilité, comme prévu.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

Dans l'e-Laboratoire, deux sous-outils liés à l'effet de flottabilité sur la diminution de la distance de sécurité dans le contexte des libérations non enflammées permettent de répondre aux deux questions suivantes.

- Question 1 : en cas de libération horizontale, à quelle distance et à quelle concentration le jet devient-il flottant et quelle est la distance de sécurité jusqu'à une concentration de 4 % v/v le long de l'axe central du jet ?
- Question 2 : en cas de libération verticale vers le bas, à quelle distance et à quelle concentration le débit commence-t-il à augmenter du fait de la flottabilité ?

Les paramètres d'entrée de cet outil sont la pression de l'hydrogène dans le réservoir p_1 , la température de l'hydrogène dans le réservoir T_1 , le diamètre de l'orifice d_3 et la pression ambiante p_4 . À titre d'exemple, le Tableau 6 répertorie les paramètres de sortie de l'outil pour la question 1.

Tableau 6 Exemple de paramètres d'entrée et de sortie de cet outil

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	7e+6	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	288	K
Orifice diameter	d_3	0.02	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
Axial distance from nozzle to C_B % by vol. H_2 where release becomes buoyant.	X	35.6746	m
Axial distance from nozzle to 4% by vol. H_2	$X_{4\%}$	44.2411	m
Axial distance from nozzle to 17% by vol. H_2	$X_{17\%}$	9.24329	m
Axial distance from nozzle to 30% by vol. H_2	$X_{30\%}$	4.5659	m
Axial distance from nozzle to 40% by vol. H_2	$X_{40\%}$	3.08551	m
Axial distance from nozzle to 50% by vol. H_2	$X_{50\%}$	2.43964	m
Axial distance from nozzle to 60% by vol. H_2	$X_{60\%}$	1.28028	m

Remerciements

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

Références

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book
2. HyFacts Project. Chapter R. Hydrogen releases and dispersion. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [accessed on 12.11.20].
3. EIGA, European Industrial Gases Association (2007). Determination of safety distances. IGC Doc 75/07/E.
4. 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

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

- 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 12.11.20].
5. Saffers, JB, Makarov, DV and Molkov, VV (2011). Modelling and numerical simulation of permeated hydrogen dispersion in a garage with adiabatic walls and still air. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36(3), pp. 2582-2588.
 6. Adams, P, Bengaouer, A, Cariteau, B, Molkov, V and Venetsanos, AG (2011). Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36, pp. 2742-2749.
 7. Dulov, VG and Luk'yanov, GA (1984) *Gasdynamics of the outflow processes*. Nauka, Novosibirsk.
 8. Ishii, R, Fujimoto, H, Hatta, N and Umeda, Y (1999). Experimental and numerical analysis of circular pulse jets. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 392, pp. 129-153.
 9. Birch, AD, Brown, DR, Dodson, MG and Swaffield, F (1984) The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. *Combustion Science and Technology*, vol. 36, pp. 249-261.
 10. Schefer, RW, Houf, WG, Williams, TC, Bourne, B and Colton, J (2007). Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2081-2093.
 11. Molkov, V, Makarov, D and Bragin, M (2009). Physics and modelling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere, In Fortov, VE et al. (eds). *Physics of Extreme State of Matter 2009*. Chernogolovka, Russia, pp.143-145.
 12. LaChance, J, Tchouvelev, A and Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36 pp. 2381-2388.
 13. Chen, CJ and Rodi, W (1980). Vertical turbulent buoyant jets - a review of experimental data, *The Science Applications of Heat and Mass Transfer series*, Vol. 4, Ed. by Chen C.J. 1980, Pergamon Press: Oxford, 83p.
 14. Molkov, V and Bragin, M (2009) High-pressure hydrogen leak through a narrow channel. In: *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere*; Torus Press: Moscow, pp. 332-338.
 15. International fire code (2006). International Code Council.
 16. NFPA 55, National Fire Protection Association (2010). Standard for the storage, use, and handling of compressed gases and cryogenic fluids in portable and stationary containers, cylinders, and tanks. Quincy, MA, 2010.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

17. Shevyakov, GG, Tomilin, VP and Kondrashkov, YuA (1980). Influence of buoyancy on the mixing length in a free turbulent jet, *Engineering Physical Journal*. deposit with VINITI, N3671-80 (in Russian).
18. Shevyakov, GG and Savelieva, NI (2004). Dispersion and combustion of hydrogen jet in the open atmosphere. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. Vol. 1(9), pp. 23-27 (in Russian).
19. Li, Z, Makarov, D, Keenan, J, Molkov, V (2015). CFD study of the unignited and ignited hydrogen releases from TPRD under a fuel cell car. 6th International Conference on Hydrogen Safety, 19-21 October 2015, Yokohama, Japan.
20. Honda FCX Specifications (2009). Available from: <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/2016Clarity-Fuel-Cell.html> [accessed on 12.11.20].
21. Tamura, Y, Takabayashi, M and Takeuchi, M (2014). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 6169-6175.
22. HyFacts Project. Chapter RM. Prevention and mitigation of releases: Detection and ventilation. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [accessed on 12.11.20].
23. 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.
24. Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program, Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan Planned program activities for 2005-2015, (2007).
25. DOE FCTO Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan, (2012). https://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/fcto_myRDD_safety_codes.pdf [accessed on 12.11.20].
26. Buttne W, Burgess R, Schmidt K, Wright H, Rivkin C et al. Hydrogen safety sensor performance and use gap analysis. 7th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2017), Hamburg, Germany, Sep 11-13, 2017.
27. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 12.11.20].
28. Bader, M. Hydrogen sensors. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells, 2014.
29. HYPER (2008). FP6 STREP project "Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications". *Deliverable 4.3 Releases, Fires and Explosions*.

Cours 7 : Libérations d'hydrogène non enflammées à l'extérieur et leur atténuation

WP4 Final Report. Available from: <http://www.hyperproject.uk/page/4942/> [accessed 12.11.20].

30. IEC 61779-1 (1998). Electrical Apparatus for the Detection and Measurement of Flammable Gases - Part 1: General Requirements and Test Methods. Standard IEC 61779-4: Performance requirements for group II apparatus indicating up to a volume fraction of 100 % lower explosive limit. International Electrotechnical Commission (IEC).
31. Blanchat, TK and Malliakos, A (1998). Performance testing of passive autocatalytic recombiners, NUREG/CR-6580, SAND97-2632.
32. ISO 26142:2010. Hydrogen detection apparatus -- Stationary applications. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization.
33. S. L. Brennan, D. V. Makarov, and V. Molkov, 'LES of high pressure hydrogen jet fire', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, no. 3, pp. 353–359, May 2009.
34. C. Chen and W. Rodi, *Vertical turbulent buoyant jets - a review of experimental data*. Oxford: Pergamon Press, 1980.
35. V. Molkov and J.-B. Saffers, 'Hydrogen jet flames', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 19, pp. 8141–8158, Jun. 2013.