

TABLE DES MATIÈRES

PREAMBULE	2
1 GENERALITES SUR L'HYDROGENE	3
1.1 - Propriétés physiques et chimiques	3
1.2 - Phases de vie de l'hydrogène	4
1.2.1 Production sur site	3
1.2.2 Stockage	3
1.2.3. La distribution	4
1.3 - Utilisations	5
1.3.1 En site isolé	5
1.3.2 Alimentation électrique de secours	5
1.3.3 Alimentation de chariots élévateurs, transpalettes	6
1.3.4 Systèmes de traction à hydrogène	6
1.3.5 Station pour véhicule à hydrogène	7
1.3.6 Présentation de la Pile à combustible	7
2 RISQUES ET PHENOMENES ASSOCIES A L'HYDROGENE	9
2.1 - Présentation des dangers associés à l'hydrogène	9
2.1.1 Risque d'asphyxie (anoxie)	9
2.1.2 Risque thermique	9
2.1.3 Risque explosif présenté par l'hydrogène	10
2.1.4 Risques cryogénique et de vaporisation	12
2.2 - Corrélations entre phénomènes et risques associés à l'hydrogène	12
2.2.1 Recensement des phénomènes	12
Recensement des scénarios possibles	13
2.3 - Etude des technologies	14
2.3.1 Présentation des différents emballages	14
2.3.2 Comportement des emballages en cas d'accident	14
3 PROCEDURES D'INTERVENTIONS	16
3.1 - Règles générales pour les interventions	16
3.1.1 Tenues	16
3.1.2 Conditions météorologiques du jour	16
3.1.3 Stationnement des engins de secours	16
3.1.4 Chronologie de l'intervention	16
3.2 - Secours à personne	17
3.3 – Incendie:	18
3.3.1 Feu de la partie électrique de l'installation de production d'énergie à H ₂	18
3.3.2 Feu menaçant l'installation H ₂ ou le stockage H ₂	19
3.3.3 Fuite enflammée d'H ₂	20
3.4 - Fuite d'hydrogène	21
ANNEXE I : Définitions	
ANNEXE II : Liste des abréviations	
ANNEXE III : Tableaux de synthèse, Arbres de décision	
ANNEXE IV : Pour aller plus loin ...	
ANNEXE V : Notas – Renvois - Références – Bibliographies	

PREAMBULE

Le présent document reflète, en l'état des connaissances, ce qui a trait à la technologie et l'utilisation relatives à l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie, en France.

Les sapeurs pompiers sont susceptibles d'être confrontés de plus en plus souvent aux risques générés par l'hydrogène. L'emploi de l'hydrogène est de plus en plus régulier et de nouveaux moyens de conditionnement apparaissent.

Ce document a pour objet de proposer aux sapeurs pompiers une analyse des risques, en particulier pour ce qui relève des nouveaux moyens de stockage haute pression et de nouvelles utilisations de l'hydrogène, et de définir des stratégies globales d'intervention destinées à réduire ou à inhiber ces risques, de manière pérenne.

Ces technologies sont en constant changement et des mises à jour seront nécessaires dans le futur.

Par ailleurs, l'information des sapeurs-pompiers est un préalable au bon déroulement des opérations de secours.

Il est vivement recommandé aux services des DREAL et aux industriels, de signaler aux services départementaux d'incendie et de secours les projets d'installations utilisant de l'hydrogène.

Les termes techniques utilisés dans cette note sont définis dans un glossaire figurant en annexe I.

Enfin, il est important de noter que cette NIO ne remet pas en cause l'analyse des risques effectués :

- sur un stockage fixe (cf. « Étude de Dangers ») ;
- sur les Transports de Matières Dangereuses – TMD

1 GENERALITES SUR L'HYDROGENE

1.1. Propriétés physiques et chimiques

L'hydrogène est le plus léger des gaz. En milieu non confiné, l'hydrogène a donc tendance à monter et à se diluer très vite dans l'air, ce qui peut être considéré comme étant un facteur de sécurité.

L'hydrogène est inflammable. Sa flamme est difficilement détectable, dissipe peu de chaleur radiante, elle est incolore, inodore, non toxique et quasiment invisible.

En mélange avec l'oxygène contenu dans l'air (ou un autre comburant), l'hydrogène provoque la formation d'atmosphères explosives.

Les mélanges hydrogène / air peuvent, dans certaines conditions (cf. 2.1.2 - Risque thermique) s'enflammer sous l'action de sources d'ignition contenant très peu d'énergie : un simple phénomène d'électricité statique par exemple, peut suffire à provoquer une ignition.

1.2 Phases de vie de l'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique, il doit être fabriqué avant d'être stocké et utilisé.

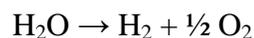
Les deux principales nouvelles utilisations de l'hydrogène sont :

- la pile à combustible (notamment pour les véhicules électriques ou hybrides) , les moteurs thermiques, les turbines à gaz pour produire de l'électricité ;
- les nouveaux systèmes de cogénération pour produire de l'énergie (électricité et chaleur).

1.2.1 Production sur site

Le recours croissant aux sources renouvelables conduit aujourd'hui au développement de l'électrolyse.

La réaction de décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de manière globale :



Cette réaction nécessite un apport d'énergie électrique, un dégagement de chaleur en découle.

1.2.2 Stockage

L'hydrogène peut être stocké sous forme liquide, gazeuse ou hydrure.

1.2.2.1 Forme Liquide

Pour être stocké à l'état liquide, la température de l'hydrogène doit être abaissée en-dessous de sa température d'ébullition à la pression atmosphérique. Cela signifie que l'hydrogène liquide est stocké à -250°C.

A cette température, il est primordial d'utiliser les équipements de protection individuelle adaptée (gants et tablier cryogénique, lunettes de protection) - cf. paragraphe 2.1.4 Risques cryogénique et de vaporisation.

1.2.2.2 *Forme gazeuse*

Afin d'augmenter la quantité d'hydrogène pouvant être stockée dans un réservoir, on le comprime en augmentant sa pression.

La pression des réservoirs peut varier de plusieurs dizaines, à plusieurs centaines de bar.

1.2.2.3 *Forme hydrure*

Une méthode de stockage de l'hydrogène, repose sur la formation d'hydrures métalliques solides. Aujourd'hui on utilise principalement une technique qui consiste à « piéger » l'hydrogène dans une pastille métallique de magnésium (MgH_2).



Cette technologie permet de minimiser le risque associé au stockage d'importantes quantités d'hydrogène.

Une pastille de 43g contient $0,5\text{ m}^3$ d'hydrogène.

Il existe des projets de recherche pour stocker de manière différente l'hydrogène sous forme solide.

1.2.3. *La distribution*

Selon l'utilisation finale et les quantités nécessaires, l'hydrogène peut être transporté :

- par la route, le rail, ou voie navigable ;
- stocké en bouteilles, en « cigares », en réservoir ;
- sous pression ou liquéfié réfrigéré.

Lorsqu'il est stocké en bouteille sous pression, l'hydrogène est identifiable au travers de :

- la tête de l'ogive de couleur rouge (inflammable) ;
- l'étiquette banane sur laquelle figurent les renseignements relatifs au gaz et au producteur.



Lorsqu'il est transporté en wagon, camion-citerne ou barge de transport, l'hydrogène est identifiable par la plaque danger et le pictogramme danger suivants :

Hydrogène sous-pression



Hydrogène réfrigéré

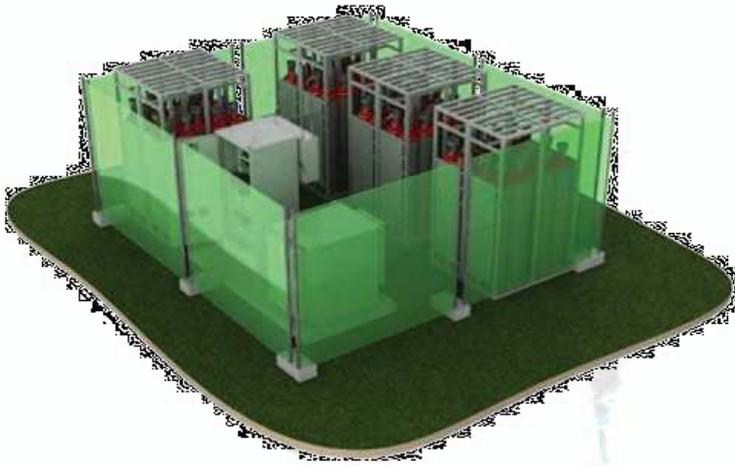


L'hydrogène est également transporté par canalisation (gazoduc), le Nord de l'Europe est traversé par un important réseau de plusieurs milliers de kilomètres.

1.3 Utilisations

1.3.1 En site isolé :

Générateur électrique propre, autonome pour l'alimentation temporaire ou permanente de sites isolés tels que, des antennes de télécommunication, vidéo surveillance, signalisation, éclairage, capteurs de mesure.



Tension nominale 230 V (courant alternatif)

Puissance nominale 2,75 kVA / 230 V (courant alternatif)

Puissance maximale 5 kW

Capacité des batteries 150 Ah à 48 V

Autonomie des batteries 1h à 2 kVA

Tension nominale 220 V (courant alternatif)
/ 50 Hz

Puissance nominale 2 kVA

Puissance maximale :
- 6 kVA pendant 10 s ;
- 4,5 kVA pendant 30 min



1.3.2 Alimentation électrique de secours :

Même concept que pour les groupes électrogènes thermiques.

Dans ce cas, il s'agit d'un dispositif couplé à une pile à combustible.



1.3.3 Alimentation de chariots élévateurs, transpalette :



Tension nominale +/- 24 V ou +/- 48 V ou +/- 80V en courant continu.

Puissance nominale 1.5 à 3 kVA/ 24 V ou 10kVA / 48 V ou 14kVA/80 V en courant continu.

1.3.4 Systèmes de traction à hydrogène :

Les systèmes de traction à hydrogène prennent en charge l'ensemble des besoins de traction du véhicule et délivrent une puissance maximum qui peut varier de 50 à 120 kVA pour les modèles actuels.

Ces systèmes sont adaptés à tous les types d'utilisations, qu'elles soient routières ou urbaines. Leur rendement varie avec la charge (poids du véhicule). Il est optimum entre 10 et 30 % de la charge maximum donc bien adapté au cycle urbain.

La consommation en hydrogène d'un véhicule léger varie de 0,8 à 1,2 kg/100 km. Cela nécessite d'embarquer entre 2 et 6 kg d'hydrogène selon le type de véhicule et l'utilisation envisagée.

Le stockage de gaz sous pression constitue une solution simple. Cette technologie est actuellement utilisée pour le gaz naturel sous 200 bars et concerne environ 1,5 millions de véhicules dans le monde.

Pour l'hydrogène les pressions de stockage sont de plus en plus élevées. De 350 bars à l'origine, elles se généralisent maintenant à 700 bars. Les réservoirs sont constitués d'un liner en aluminium ou en polymère renforcé par un enroulement filamentaire à base de fibre de carbone et résine époxy.



Figure 1 : Bus hydrogène – 25 à 40kg d'H2



Schéma 1: Schéma de principe d'une voiture H2

Le développement de la filière hydrogène dans l'industrie automobile devrait commencer par les flottes captives, les chariots élévateurs, les moyens de transports publics puis s'étendre aux

particuliers. Cela se traduira par un développement des stations services dédiées à la recharge des véhicules.

1.3.5 Station pour véhicule à hydrogène

Une station de remplissage hydrogène consiste à utiliser la technologie liée à la distribution d'hydrogène gazeux afin de remplir le réservoir de véhicules hydrogènes dans des conditions aussi simples que pour l'essence ou le diesel.

La pression de remplissage peut atteindre 700 bars (permet de faire le plein entre 3 et 5 minutes pour une voiture et 10 minutes pour un poids lourd).

Les standards de sécurité utilisés dans l'industrie sont appliqués à ces stations.



Figure 2: remplissage d'une voiture H₂



Figure 3: station de remplissage de chariot élévateur à hydrogène

1.3.6 Présentation de la Pile à combustible

Le principe est assez simple : il s'agit d'une réaction d'oxydo-réduction électrochimique et contrôlée, entre de l'hydrogène et de l'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur et selon la réaction chimique :

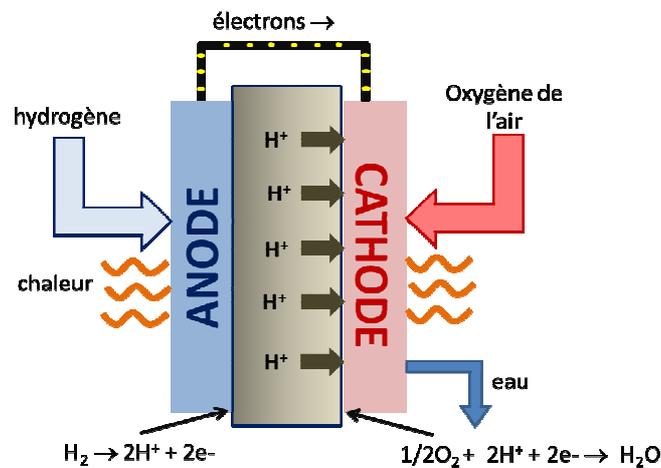
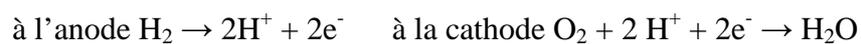
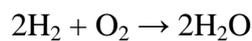


Schéma 2: fonctionnement de la pile

Alimentation en fluides gazeux : à la cathode, la pile est alimentée en O_2 de l'air sous une pression qui varie, selon les constructeurs, de quelques centaines de millibars à 1,5 bar.

La pile est alimentée en H_2 à partir d'un système de régulation qui impose le débit souhaité sous une pression sensiblement égale à la pression cathodique.

Élimination de l'eau produite : le débit d'air à la cathode draine l'eau produite par la réaction et traverse un séparateur en sortie de la pile. Cette eau peut être soit stockée pour servir à diverses fonctions, soit être directement rejetée à l'extérieur.

Élimination de la chaleur : la puissance thermique produite dans la cellule est du même ordre de grandeur que la puissance électrique et doit être évacuée pour éviter la surchauffe.

2 RISQUES ET PHENOMENES ASSOCIES A L'HYDROGENE

2.1 Présentation des dangers associés à l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz incolore, inodore, non toxique et non corrosif susceptible de générer en particulier, un risque d'asphyxie (anoxie), un risque thermique et un risque explosif.

2.1.1 *Risque d'asphyxie (anoxie)*

Comme pour tous les gaz, l'augmentation de la concentration en hydrogène entraîne la diminution du taux d'oxygène qui peut provoquer une asphyxie (anoxie).

Le risque d'asphyxie interviendra essentiellement dans les milieux confinés.

L'hydrogène est un gaz très léger (densité : 0,066) ; il aura donc tendance à monter⁵ et à se diluer très vite dans l'air en milieu ouvert.

Il convient toutefois de noter que si les conditions sont propices à l'apparition du risque d'asphyxie (d'anoxie), l'apparition du risque d'explosion sera malgré tout prépondérante.

2.1.2 *Risque thermique*

La réaction de combustion de l'hydrogène dans l'air correspond à l'équation bilan suivante :



L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable dans les conditions normales de températures et de pression⁶. Il se caractérise par les données suivantes⁷.

Propriétés	Données associées
Limité Inférieure d'Inflammabilité (LII)	4%
Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI)	75%

Tableau 1: Caractéristiques d'inflammabilité de l'hydrogène

Les caractéristiques essentielles de l'hydrogène sont une plage d'inflammabilité très large et une énergie d'inflammation très faible.

Il convient ainsi de préciser qu'une simple décharge d'électricité statique est de nature à enflammer l'hydrogène. Il est donc important de noter que la probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est très importante⁸.

La flamme résultant de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et avoisine les 2000°C¹⁰.

La flamme d'hydrogène rayonne¹¹ peu. Cette propriété limite ainsi le risque de propagation en cas d'incendie. Cela peut être illustré par les flux thermiques dégagés lors de l'inflammation d'une fuite d'hydrogène sur une canalisation (tableaux ci-après).

Scénario de fuite de canalisation	Pression du réservoir (bar)	Inflammation immédiate (fuite enflammée)			Inflammation retardé (boule de feu)		
		Effets thermiques de longue durée (kW/m ²)			Effets thermiques de courte durée		
		3 kW/m ²	5 kW/m ²	8 kW/m ²	SEI ¹⁴	SEL ¹⁵	SELS ¹⁵
		Les distances sont en m			Les distances sont en m		
Flexible de semi-remorque	200	7,2	7,2	7,2	7	6,4	6,4
0,1 mm		0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
0,2 mm		0,5	0,4	0,4	0,9	0,8	0,8
4 mm		11	9	8	17,6	16	16
0,1 mm	525	0,4	0,3	0,3	0,8	0,7	0,7
0,2 mm		0,7	0,6	0,6	1,5	1,3	1,3
2,3 mm		9	7,9	7	17	15	15
4 mm		17	15	13	29	26	26
5,16 mm		22	19	17	37	34	34
0,1 mm	450	0,2	0,2	0,2	0,7	0,6	0,6
0,2 mm		0,3	0,3	0,3	1,5	1,2	1,2
4 mm		16	14	12	27	24	24
5,16 mm		21	18	16	35	31	31
0,1 mm	700	0,2	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8
0,2 mm		0,8	0,4	0,4	1,72	1,5	1,5
2,3 mm		10	9	8	19	18	18
4 mm		19	17	15	33	30	30

Tableau 2: Corrélation flux thermiques et distances lors de l'inflammation d'une fuite d'hydrogène sur une canalisation en fonction du diamètre de fuite et de la pression du réservoir¹²

2.1.3 Risque explosif présenté par l'hydrogène

La Plage d'explosivité de l'hydrogène est très large, si l'on considère que les limites d'inflammabilité sont similaires¹⁶ aux limites d'explosivité.

La vitesse de propagation de la flamme permet de déterminer la nature du régime énergétique de l'explosion :

- soit la déflagration : le front de flamme se déplace à une vitesse subsonique, les gaz frais sont alors comprimés par l'expansion du volume, on observe une augmentation continue de la pression dans le nuage gazeux ;
- soit la détonation : la vitesse de propagation de la flamme est supersonique, on observe la formation d'une onde de choc.

La flamme d'hydrogène se propage beaucoup plus rapidement que les combustibles usuels (GNV, GPL) : le risque de détonation ne doit donc pas être écarté.

Scénario de fuite de canalisation	Pression du réservoir (bar)	Longueur de flamme (m)	Inflammation retardée (boule de feu)			
			Effets de surpression (mbar)			
			20	50 (SEL)	140 (SEL)	200 (SELS)
			Les distances sont en mètre			
Flexible de semi-remorque	200		13,1	8,2		
0,1 mm		0,2	0,5			
0,2 mm		0,4	1	0,5		
4 mm		7	20	10	6	5
0,1 mm	525	0,4	1	0,5		
0,2 mm		0,8	2	1		
2,3 mm		7	18	9	6	5
4 mm		12	32	16	9	8
5,16 mm	450	15	42	21	12	10
0,1 mm		0,3	0,8	0,4		
0,2 mm		0,7	1,4	0,7		
4 mm		11	30	15	9	7
5,16 mm	700	14	38	19	11	9
0,1 mm		0,5	1	0,5		
0,2 mm		0,8	2	1		
2,3 mm		8	22	11	6	5
4 mm		14	38	19	11	9

Tableau 3: Corrélation surpression et distances lors de l'inflammation d'un nuage d'hydrogène suite à une fuite sur une canalisation en fonction du diamètre de fuite et de la pression du réservoir¹²

- Les diamètres 0,1 et 0,2 mm correspondent à une fuite accidentelle (défaillance) d'un équipement ;
- Le diamètre de 2,3 mm correspond au diamètre de la lyre d'un cadre H4 ;
- Le diamètre de 4 mm correspond au diamètre d'une lyre de cadre 200 bars (voir annexe I).

2.1.4 Risques cryogénique et de vaporisation

L'état liquide étant plus favorable au stockage et au transport, l'hydrogène est maintenu à -252,8°C (soit 20,35°K), sous une pression comprise entre 1 et 10 bars.

Dans cet état, il est comparable à un liquide cryogénique.

Trois dangers sont à associer à l'hydrogène à l'état liquide cryogénique. Il s'agit :

- de la capacité à être extrêmement froid (risque cryogénique) ;
- de la propension qu'ont les petites quantités de liquide à occuper de très grands volumes en passant à l'état gazeux (risque de vaporisation).
- de sa température inférieure au point de condensation de l'air, entraînant un enrichissement en oxygène des zones non isolées en contact avec l'hydrogène liquide, (voir dangers de l'oxygène liquide).

- Risque cryogénique : les liquides cryogéniques sont susceptibles de provoquer des effets sur la peau similaires aux brûlures thermiques.

- Risque de vaporisation : en cas de fuite, un litre d'hydrogène liquide se vaporise en 780 litres de gaz, ce qui peut entraîner un risque d'anoxie, essentiellement en milieu confiné.

2.2 Corrélations entre phénomènes et risques associés à l'hydrogène

2.2.1 - Recensement des phénomènes

Les incidents ou les accidents susceptibles de faire apparaître les risques précédemment évoqués concernant l'hydrogène peuvent être recensés au sein de la matrice présentée à la page suivante.

2.2.1.1 - Phénomènes associés à l'éclatement d'un réservoir

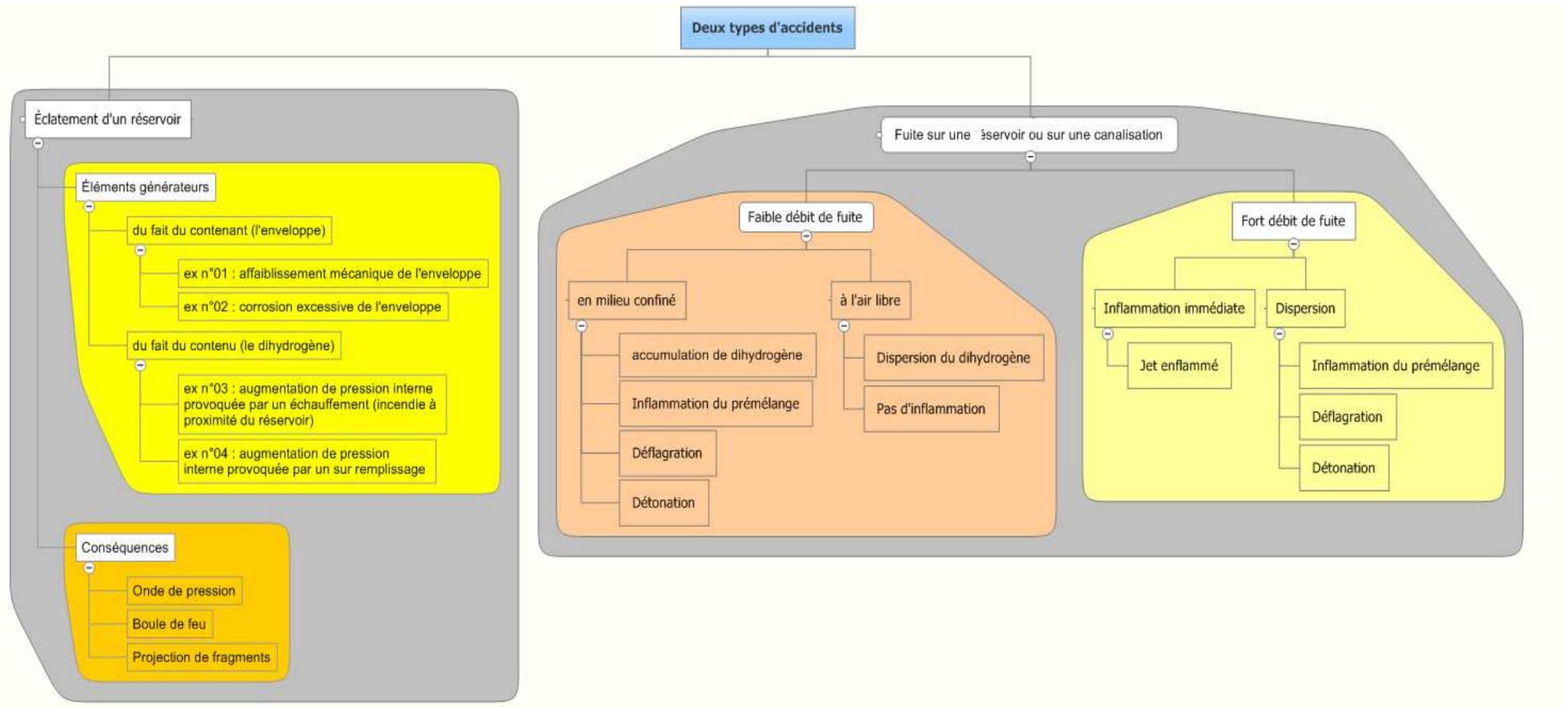
Le dimensionnement des effets thermiques, de surpression et d'éjection dans le cadre de la mise en œuvre du zonage réfléchi pourra être modélisé à l'aide des outils habituellement utilisés par les chefs de cellules mobiles d'intervention chimiques.

2.2.1.2 - Phénomènes associés à une fuite

Les suites²¹ d'une fuite d'hydrogène survenant sur une canalisation ou sur une enceinte de stockage dépendent principalement de 3 facteurs : le débit de fuite (voir Annexe IV), le confinement et la présence d'une source d'ignition.

Le bruit généré par une fuite d'hydrogène est, du fait de la taille des molécules, de la pression et de sa vitesse d'échappement, très important (voir annexe IV). Ainsi un cadre ouvert, dont l'orifice de sortie de la lyre mesure 4mm produit un son de 130dB à environ 1,5m et sous une pression de 200 bars.

Recensement des scénarios possibles :



2.3 Etude des technologies

2.3.1 Présentation des différents emballages

Le stockage de l'hydrogène est réalisable sous haute pression dans des enveloppes répondant aux caractéristiques suivantes²³ :

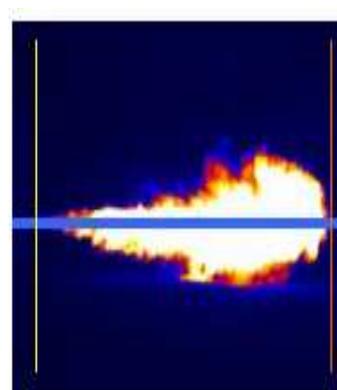
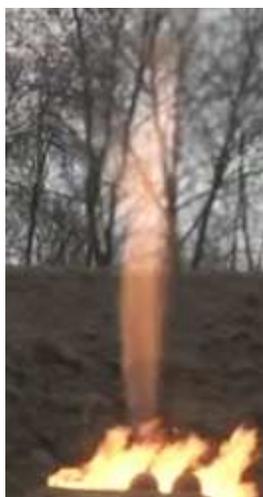
Composition	Désignation	Pression de stockage (bars)	Pression d'éclatement (bars)	Volume de l'enceinte en eau (litres)	Volume d'hydrogène contenu (m ³)	Masse d'hydrogène contenu (kg)
Composite Type III	Bouteille 74 litres	350	595	74	20	1,8
Composite Type IV	Cadre H4 B142	525	578	568	207,5	18,7
	Bouteille 80 litres	700	770	80	35,8	3,2
	Cadre H4 B142	700	770	568	254,1	22,8
	B142	700	770	142	63,5	5,7
Acier Type I	B 20 litres	200	380	20	3,3	0,3
	B50 litres	200	380	50	8,4	0,75
	Cadre V9 B50	200	380	450	75,2	6,76
	Cadre V18 B50	200	380	900	150,4	13,5

Tableau 2: Comparaison entre bouteilles acier et bouteilles composites (exemples non exhaustifs)

2.3.2 Comportement des emballages en cas d'accident

Les bouteilles ne sont pas toutes équipées de fusible thermique (organe destiné à favoriser la vidange du gaz contenu). C'est pourquoi, dans le doute, il faudra systématiquement considérer l'absence de tels dispositifs sur intervention tout en prenant en compte les dangers potentiels d'un déclenchement intempestif du fusible (flux thermique).

Le fusible se déclenche à une température comprise entre 100 et 120°C. Il doit permettre une vidange rapide de la bouteille en cas d'échauffement et d'éviter alors le risque d'éclatement.



Photos prises lors d'une fuite verticale et horizontale

Dans une configuration normale, le rejet peut se faire verticalement ou horizontalement. Malgré tout le diamètre de l'orifice du fusible n'est pas uniforme et ne permet pas de déterminer une longueur de flamme.

Pour les bouteilles privées de ce type d'équipement, et en cas d'accident, une perte d'étanchéité sera constatée, voire un éclatement.

3 PROCEDURES D'INTERVENTIONS

Pour toutes interventions, la marche générale des opérations (MGO) s'applique.

Ainsi, les opérations de :

- Reconnaissance,
- Sauvetages,
- Etablissements,
- Attaque,
- Protection,
- Déblai,
- Surveillance,

restent pertinentes, en particulier pour les opérations liées à l'incendie, mais se déclineront de manières différentes suivant la typologie de l'intervention.

Au regard de l'analyse de l'intervention, les opérations élémentaires de la MGO sont à réaliser en prenant en compte les actes ou actions élémentaires déclinés ci-après.

Ces points sont à aborder ou à ignorer. Les conclusions de l'analyse de la zone d'intervention permettront alors de suivre la chronologie en passant à l'acte ou à l'action élémentaire suivant(e), certaines actions pouvant être réalisées simultanément.

3.1 Règles générales pour les interventions

3.1.1 Tenues

Le port de la tenue de feu complète et de l'appareil respiratoire isolant (ARI) est obligatoire.

3.1.2 Conditions météorologiques du jour

Quelle que soit l'intervention à laquelle les sapeurs-pompiers devront faire face, les conditions météorologiques sont des informations capitales pour le commandant des opérations de secours.

3.1.3 Stationnement des engins de secours

Les conditions météorologiques du jour et la configuration du terrain conditionnent le stationnement des engins qui seront placés en dehors de la zone d'exclusion.

L'engagement des premiers engins, la modification de la zone d'exclusion en cours d'action, etc., sont des événements susceptibles de ne pas permettre de respecter cette préconisation.

3.1.4 Chronologie de l'intervention

Le commandant des opérations de secours doit prendre le recul nécessaire pour identifier le risque prioritaire à prendre en compte à chaque phase de l'intervention et ainsi adapter sa tactique.

La chronologie qui suit reprend les principales phases de la marche générale des opérations en y intégrant les particularités propres aux installations où l'hydrogène est utilisé comme source d'énergie électrique (pile à combustible, chariot élévateur, véhicule automobile, etc.).

Pour les interventions faisant suite à une fuite (enflammée ou non), le commandant des opérations de secours devra prendre en compte le phénomène sonore (voir 2.2.1.2 - Phénomènes associés à une fuite).

3.2 - Secours à personne :

Les interventions peuvent être regroupées selon les trois situations opérationnelles suivantes :

- incident ou accident de personne non directement lié à une installation de production d'énergie à H₂ ;
- malaise dû à une dette en oxygène (anoxie) suite à fuite d'H₂ en milieu confiné ;
- électrisation/électrocution par contact avec l'installation suite à dégradation ou dysfonctionnement ;
- brûlure suite à une fuite d'hydrogène (inflammation immédiate ou retardée).

De par le caractère difficilement perceptible d'un risque électrique ou d'une fuite d'H₂ (inodore et incolore), ces risques sont à redouter en priorité.

MGO	Actes ou actions élémentaires	Objectifs
Reconnaissance	Identifier	- Prendre contact avec le responsable sécurité de l'installation pour obtenir des précisions sur l'incident ; - Prendre en compte le risque d'explosion de l'H ₂ dans les locaux confinés ; - Prendre en compte le risque d'anoxie dans les locaux confinés.
	Interdire	- Interdire la progression « au vent » et établir impérativement une zone d'exclusion à 50m ; - Interdire les appareils électriques ou électroniques non ATEX dans la zone d'exclusion (téléphones portables, Bip, postes radio...).
	Inspecter	- Actionner les coupures d'énergie extérieures au bâtiment ;
Sauvetage	Intervenir Isoler	- <u>Si local confiné et fuite H₂:</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Port de l'ARI obligatoire • évacuer la victime en urgence en dehors de la zone d'exclusion
Établissement/ Attaque		- Confirmer ou infirmer la zone d'exclusion a priori (50m) - Effectuer des relevés d'explosimétrie (du haut vers le bas de l'installation ou du stockage)
Protection		- <u>Actions sur le risque anoxie:</u> <ul style="list-style-type: none"> • fermer les vannes d'alimentation en H₂ • ventiler les locaux en favorisant le tirage naturel (proscrire les moyens de désenfumage électrique et thermique)
		- <u>Action sur le risque électrique:</u> → Agir sur le coup de poing d'arrêt d'urgence de l'installation (temporisation de 20mn avec présence de courant rémanent)
Déblai Surveillance		- La phase de surveillance cesse dès que l'on s'est assuré : <ul style="list-style-type: none"> • que le taux d'oxygène dans le local est normal (20% environ) • de l'absence d'ATEX par des relevés d'explosimétrie • que l'installation électrique est sécurisée et prise en charge par un technicien

3.3 – Incendie:

Les interventions peuvent être regroupées selon les trois situations opérationnelles suivantes :

- Feu de la partie électrique de l'installation de production d'énergie à H₂ ;
- Feu menaçant l'installation H₂ ou le stockage H₂ ;
- Fuite enflammée d'H₂.

3.3.1 - Feu de la partie électrique de l'installation de production d'énergie à H₂:

MGO	Actes ou actions élémentaires	Objectifs
Reconnaissance	Identifier	- Prendre contact avec le responsable sécurité de l'installation pour obtenir des précisions sur l'incident ; - Prendre en compte le risque électrique « basse tension ».
	Interdire	- Interdire la progression « au vent » et établir impérativement une zone d'exclusion à 50m ; - Interdire les appareils électriques ou électroniques non ATEX dans la zone d'exclusion.
	Inspecter	- Actionner les coupures d'énergie extérieures au bâtiment.
Sauvetage		- Voir 3.2 – secours à personne.
Établissement/ Attaque		- Confirmer ou infirmer la zone d'exclusion (bruit d'une fuite d'H ₂ sous pression, relevés d'explosimétrie, etc.) ; - Procéder à l'extinction du sinistre en fonction de sa virulence: ➔ avec un extincteur poudre ou CO ₂ à une distance > 1m ➔ avec une LDV en jet diffusé d'attaque par impulsion à une distance > 3m
Protection	Intervenir Isoler	- Actionner le coup de poing d'arrêt d'urgence de l'installation (temporisation de 20mn avec présence d'un courant rémanent) ; - Prendre en compte le sens d'écoulement des eaux d'extinction durant la phase de temporisation de mise à l'arrêt de l'installation (risque électrique) ; - Fermer les vannes d'alimentation H ₂ ; - Assurer la ventilation des locaux en facilitant le tirage naturel (ouverture exutoires existants).
Déblai Surveillance		- Effectuer des relevés de points chauds ou de température à l'aide de moyens adaptés de type caméra thermique ou pyromètre, sur les stockages d'H ₂ ; - La phase de surveillance cesse dès lors que l'on constate que les actions visant aux mesures d'extinction se sont avérées efficaces.

3.3.2 - Feu menaçant l'installation H₂ ou le stockage H₂

MGO	Actes ou actions élémentaires	Objectifs
Reconnaissance	Identifier	<ul style="list-style-type: none"> - Prendre contact avec le responsable sécurité de l'installation pour obtenir des précisions sur l'incident ; - Prendre en compte le risque d'explosion des réservoirs d'H₂ soumis au feu avec projections (quelques dizaines de mètres pour les bouteilles à quelques centaines pour les semi-remorques).
	Interdire	<ul style="list-style-type: none"> - Interdire la progression « au vent » et établir impérativement une zone d'exclusion à 50m ; - Interdire les appareils électriques ou électroniques non ATEX dans la zone d'exclusion.
	Inspecter	<ul style="list-style-type: none"> - Actionner les coupures d'énergie extérieures au bâtiment.
Sauvetage		<ul style="list-style-type: none"> - Voir 3.2 – secours à personne.
Établissement/ Attaque	Intervenir Isoler	<ul style="list-style-type: none"> - Confirmer ou infirmer la zone d'exclusion (réservoirs ou installation directement menacés par les flammes) ; - Procéder à l'extinction du(des) foyer(s) ; - Assurer le refroidissement préventif des installations et stockages H₂ par les moyens suivants : <ul style="list-style-type: none"> ➔ mise en place de lances types « queue de paon » ➔ arrosage direct en JDA des réservoirs H₂ au moyen de LDV 250 au minimum (éviter de diriger les jets des LDV sur les tuyauteries) ➔ ou mise en place d'un dispositif de protection de type « défense de point sensible » sur les installations à l'air libre (baie énergie....) utilisé lors des manœuvres FDF.
Protection		<ul style="list-style-type: none"> - Actionner le coup de poing d'arrêt d'urgence de l'installation (temporisation de 20mn avec présence d'un courant rémanent) ; - Fermer les vannes d'alimentation H₂ ; - Assurer la ventilation des locaux en facilitant le tirage naturel (ouverture exutoires existants).
Déblai Surveillance		<ul style="list-style-type: none"> - Effectuer des relevés de points chauds ou de température à l'aide de moyens adaptés de types caméra thermique ou d'un pyromètre sur les stockages d'H₂ ; - La phase de surveillance cesse dès lors que l'on constate : <ul style="list-style-type: none"> ➔ que les actions visant aux mesures d'extinction se sont avérées efficaces ➔ que l'eau projetée sur les réservoirs d'H₂ ruisselle sans s'évaporer au contact.

NB : l'action sur le coup de poing d'arrêt d'urgence lors de la phase de *Protection*, permet de supprimer les sources d'ignition de natures électriques intrinsèques à l'installation impliquée.

3.3.3 – Fuite enflammée d'H₂

MGO	Actes ou actions élémentaires	Objectifs
Reconnaissance	Identifier	<ul style="list-style-type: none"> - Prendre contact avec le responsable sécurité de l'installation pour obtenir des précisions sur l'incident ; - Prendre en compte la dispersion d'H₂ dans les locaux avant inflammation (possibilité d'inflammation retardée d'un nuage d'H₂ type UVCE).
	Interdire	<ul style="list-style-type: none"> - Interdire la progression « au vent » et établir impérativement une zone d'exclusion à 50m ; - Interdire les appareils électriques ou électroniques non ATEX dans la zone d'exclusion. - Interdire d'éteindre la fuite enflammée. - Interdire les actions sur le circuit électrique de l'installation en présence d'une fuite d'H₂.
	Inspecter	<ul style="list-style-type: none"> - Actionner les coupures d'énergie extérieures au bâtiment ; - Confirmer la présence d'une fuite enflammée et sa longueur au moyen de matériels adaptés de type caméra thermique (flamme difficilement visible dans sa totalité) ; - Être attentif au bruit significatif d'une fuite de gaz enflammée.
Sauvetage		<ul style="list-style-type: none"> - Voir 3.2 – secours à personne.
Établissement / Attaque		<ul style="list-style-type: none"> - Affiner la zone d'exclusion (relevés d'explosimétrie, informations sur la nature de l'incident...) ; - Mettre en place des rideaux d'eau pour empêcher toute propagation ; - Si besoin, assurer le refroidissement préventif des installations et stockages H₂ à proximité.
Protection	Intervenir Isoler	<ul style="list-style-type: none"> - Fermer les vannes d'alimentation H₂ ; - Assurer la ventilation des locaux en facilitant le tirage naturel (ouverture exutoires existants).
Déblai Surveillance		<ul style="list-style-type: none"> - Faire des relevés de points chauds ou de température à l'aide de moyens adapté de type caméra thermique ou d'un pyromètre, sur les stockages d'H₂ ; - Effectuer des relevés d'explosimétrie dans les locaux confinés en priorisant les points hauts ; - Actionner le coup de poing d'arrêt d'urgence de l'installation (temporisation de 20mn avec présence d'un courant rémanent).

NB : l'action sur le coup de poing d'arrêt d'urgence lors de la phase de *Déblai*, permet de supprimer les sources d'ignition de natures électriques intrinsèques à l'installation impliquée.

3.4 - Fuite d'hydrogène

Les risques générés par une fuite d'H₂ vont être caractérisés par l'état (liquide ou gazeux) du conditionnement et la durée de la fuite (quelques dizaines de minutes à plusieurs heures)

On retrouve les risques suivants :

- ➔ risque d'anoxie (voir 3.2) ;
- ➔ risque de brûlure par le froid en présence d'H₂ liquide (-253 °C) ;
- ➔ risque d'inflammation (voir 3.3.3) ;
- ➔ risque d'explosion d'un mélange H₂-air dans la plage d'inflammabilité (4 à 75%).

MGO	Actes ou actions élémentaires	Objectifs
Reconnaissance	Identifier	- Prendre contact avec le responsable sécurité de l'installation pour obtenir des précisions sur l'incident (état de l'H ₂ , évaluation du temps de vidange....) ; - Prendre en compte le risque d'explosion.
	Interdire	- Interdire la progression « au vent » et établir impérativement une zone d'exclusion à 50m ; - Interdire les appareils électriques ou électroniques non ATEX dans la zone d'exclusion ; - Interdire les actions sur le circuit électrique de l'installation en présence d'une fuite d'H ₂ .
	Inspecter	- Actionner les coupures d'énergie extérieures au bâtiment.
Sauvetage		- Voir 3.2 – secours à personne.
Établissement / Attaque / Protection	Intervenir Isoler	- Affiner le périmètre de sécurité à l'aide des relevés d'explosimétrie (du haut vers le bas de l'installation) ; - Assurer la ventilation des locaux en facilitant le tirage naturel (ouverture exutoires existants) ; - Fermer les vannes d'alimentation H ₂ .
Déblai Surveillance		- La phase de surveillance cesse dès lors que l'on constate que tout risque d'explosion est écarté (vidange complète du réservoir, ou vidange à l'air libre sur une zone sécurisée et surveillée par l'exploitant, ventilation efficace des locaux...) ; - Actionner le coup de poing d'arrêt d'urgence de l'installation (temporisation de 20mn avec présence d'un courant rémanent).

NB : l'action sur le coup de poing d'arrêt d'urgence lors de la phase de *Déblai*, permet de supprimer les sources d'ignition de natures électriques intrinsèques à l'installation impliquée.

ANNEXE I

DEFINITIONS

Zone d'intervention :

Zone qui regroupe la zone d'exclusion, la zone contrôlée, la zone de soutien et tous lieux où se déroule une opération de sapeurs-pompiers.

Lyre :

- Lyre d'interconnexion : tuyaux rigides, généralement en acier qui permettent d'interconnecter des systèmes gaz, comme des cadres ou des platines de détente.
- Lyre de dilatation : formes décrites par les tuyauteries pour absorber les variations thermiques dues aux conditions extérieures. On en trouve en forme de demi-cercle, de « U », ou encore d'oméga.

Cadre :

Un cadre est le regroupement dans une structure, de plusieurs bouteilles interconnectées entre elles. Exemples :

- un cadre « V9 B50 » correspond à 9 bouteilles de 50 litres en eau regroupées verticalement,
- Un cadre « H20 B100 » correspond à 20 bouteilles de 100 litres en eau regroupées horizontalement.

Liner :

Une bouteille est faite en 2 parties : l'emballage et le liner. L'emballage assure la résistance mécanique là où le liner assure essentiellement voir intégralement l'étanchéité de la bouteille.

Buffer :

Terme anglais pour désigner une capacité tampon. Il est ici utilisé pour désigner le stockage comprimé à haute pression qui reste à demeure dans les stations services hydrogène. Leurs capacités peuvent varier de 500l à 2000l en eau pour des pressions allant de 450 à 700 bar.

ANNEXE II

ABREVIATIONS ET ACRONYMES :

ATEX	: Atmosphère explosive
TMD	: Transport de Marchandises Dangereuses
JDA	: Jet Diffusé d'Attaque
LDV	: Lance à Débit Variable
FDF	: Feux de Forêts
UVCE	: Unconfined Vapour Cloud Explosion – Explosion de vapeur en milieu non confiné
ARI	: Appareil respiratoire isolant
COS	: Commandant des Opérations de Secours
MGO	: Marche Générale des Opérations
DREAL	: Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
K	: degré Kelvin
kVA	: kilo volt ampère – unité de puissance ($P = U \times I$)
LII	: Limite Inférieure d'Inflammabilité
LSI	: Limite Supérieure d'Inflammabilité
SEL	: Seuil des Effets Létaux
SELS	: Seuil des Effets Létaux Significatifs
SEI	: Seuil des Effets Irréversibles
GPL	: Gaz de Pétrole Liquéfié
GNV	: Gaz Naturel pour Véhicules

ANNEXE III

TABLEAUX DE SYNTHÈSE, ARBRES DE DÉCISION

Scénario d'éclatement	Type de bouteille (bar)	Pression du réservoir (bar)	Pression de rupture (bar)	Effets thermiques de courte durée			Effets de surpression (mbar)			
				SEI [m]	SEL [m]	SELS [m]	20 [m]	50 [m]	140 [m]	200 [m]
Bouteille 20l	I	200	380	6	5	5	28	14	6	4
Bouteille 50l	I	200	380	8	7	7	38	19	8	6
Cadre V9 – V18 B50	I	200	380	8	7	7	38	19	8	6
Cigare semi-remorque 2m ³	I	200	430	13,2	12	12	134	67	29	22
Bouteille 74l	III	350	595	11	10	10	50	25	11	8
Buffer 1m ³	I	450	855	27	24	24	134	67	29	21
Buffer 2m ³	I	450	855	34	31	31	170	85	36	26
Cadre H4 B142	IV	525	578	15	13	13	62	31	13	9
Cadre H4 B142	IV	700	770	16	14	14	68	34	15	10
Bouteille 80l	IV	700	770	13	12	12	56	28	12	9

Scénario de fuite de canalisation	Pression du réservoir (bar)	Inflammation immédiate (fuite enflammée)			Inflammation retardé phénomène de boule de feu							Longueur de flamme [m]
		Effets thermiques de longue durée			Effets thermiques de courte durée			Effets de surpression (mbar)				
		3 [m]	5 [m]	8 [m]	SEL [m]	SELS [m]	SELS [m]	20 [m]	50 [m]	140 [m]	200 [m]	
Flexible de semi-remorque	200	7,2	7,2	7,2	7	6,4	6,4	13,1	8,2			
0,1 mm		0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5				0,2
0,2 mm		0,5	0,4	0,4	0,9	0,8	0,8	1	0,5			0,4
4 mm		11	9	8	17,6	16	16	20	10	6	5	7
0,1 mm	525	0,4	0,3	0,3	0,8	0,7	0,7	1	0,5			0,4
0,2 mm		0,7	0,6	0,6	1,5	1,3	1,3	2	1			0,8
2,3 mm		9	7,9	7	17	15	15	18	9	6	5	7
4 mm		17	15	13	29	26	26	32	16	9	8	12
5,16 mm		22	19	17	37	34	34	42	21	12	10	15
0,1 mm	450	0,2	0,2	0,2	0,7	0,6	0,6	0,8	0,4			0,3
0,2 mm		0,3	0,3	0,3	1,5	1,2	1,2	1,4	0,7			0,7
4 mm		16	14	12	27	24	24	30	15	9	7	11
5,16 mm		21	18	16	35	31	31	38	19	11	9	14
0,1 mm	700	0,2	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	1	0,5			0,5
0,2 mm		0,8	0,4	0,4	1,72	1,5	1,5	2	1			0,8
2,3 mm		10	9	8	19	18	18	22	11	6	5	8
4 mm		19	17	15	33	30	30	38	19	11	9	14

Temps de fuite	Pression du réservoir (bar)	Temps de vidange						
		0,1 mm	0,25 mm	1 mm	2,3mm	4 mm	5,3 mm	9,1 mm
Bouteille 20 l	200	128 min	21 min			5 sec		
Bouteille 50 l	200	320 min	52 min			12sec		
Cadre V9 B50	200	48 h	461 min			2 min		
Cadre V18 B50	200	96 h	921 min			4 min		
Cigare semi-remorque 2m ³	200	213 h	34,08 h			8 min		
Bouteille 74 l	350	10 h	2 h	6		23 sec		
Buffer 1m ³	450	144 h	23,04 h				3,1 min	1 min
Buffer 2m ³	450	288,02 h	46,08 h				6,2	2,1 min
Cadre H4 B142	525	85,85 h	13,74 h	52	10 min			
Cadre H4 B142	700	93,4 h	15 h	56	11 min			
Bouteille 80 l	700	13,16 h	127 min	8	1,5			

ANNEXE IV

POUR ALLER PLUS LOIN...

Caractéristiques physico-chimiques du dihydrogène :

Désignation	Valeur	Observations
Température critique	-240 °C (ou 33,15 °K)	Il s'agit des coordonnées du point critique
Pression critique	12,98 bar	
Température au point triple	-259,3 °C (ou 13,85 °K)	Il s'agit des coordonnées du point triple
Pression au point triple	0,0072 bar	
Point de fusion	-259°C (ou 14,15°K)	à 1,013 bar
Point d'ébullition	-252,8°C (ou 20,35°K)	
Masse volumique de la phase liquide	70,973 Kg/m ³	
Masse volumique de la phase gazeuse	1,312Kg/m ³	

Caractéristiques d'inflammabilité du dihydrogène :

Propriétés	Données associées
Limité Inférieure d'Inflammabilité (LII)	4% volume dans l'air
Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI)	75% volume dans l'air
Energie minimale d'inflammation	20μJ
Température d'auto inflammation	585°C

Données¹ caractérisant la combustion du dihydrogène :

Propriétés	Données associées
Pouvoir Calorifique Inférieur	10 800 kJ/m ³
Pouvoir Calorifique Supérieur	12 770 kJ/m ³
Mélange stœchiométrique dans l'air	29,53%

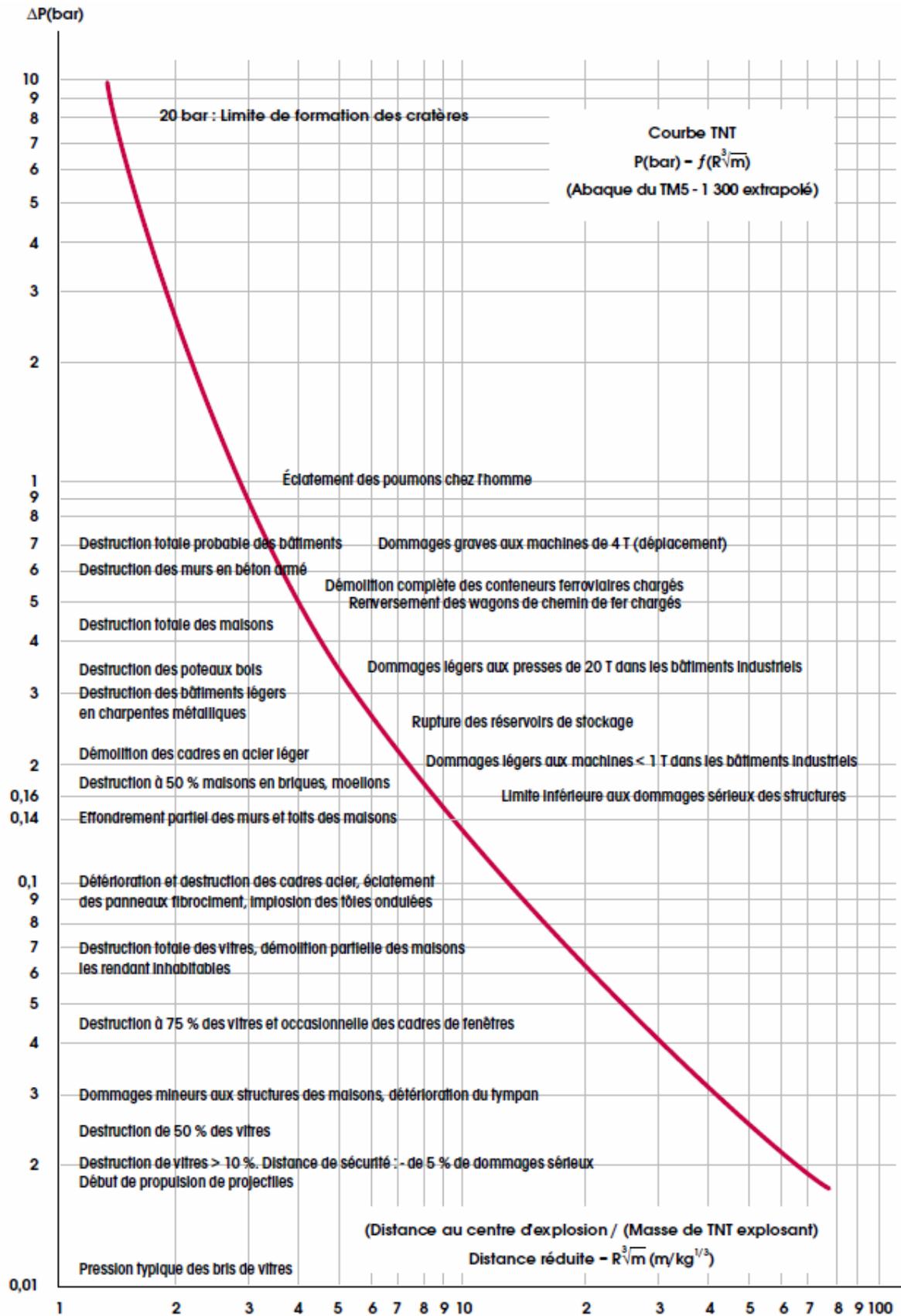
Il convient ainsi de remarquer que la combustion pourra intervenir lorsque que la concentration en dihydrogène dans l'air sera comprise entre 4% et 75%. La réaction d'oxydoréduction associée sera complète lorsque le mélange sera dans les proportions stœchiométriques.

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression :

Niveau de surpression	20 mbar	50 mbar	140 mbar	200 mbar	300 mbar
Effets sur les structures	Seuil des destructions significatives des vitres	Seuil des dégâts légers sur les structures	Seuil des dégâts graves sur les structures	Seuil des effets domino	Seuil des dégâts très graves pour les structures
Effets sur l'homme	Seuil des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme	Seuil des effets irréversibles délimitant la zone des dangers significatifs pour la vie humaine	Seuil des effets létaux délimitant la zone des dangers graves pour la vie humaine	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la zone des dangers très graves pour la vie humaine	

¹ In Fiche n°2.1 - les données de base sur l'hydrogène, mars 2001, Association Française de l'Hydrogène (AFH2).

Courbe équivalent TNT :

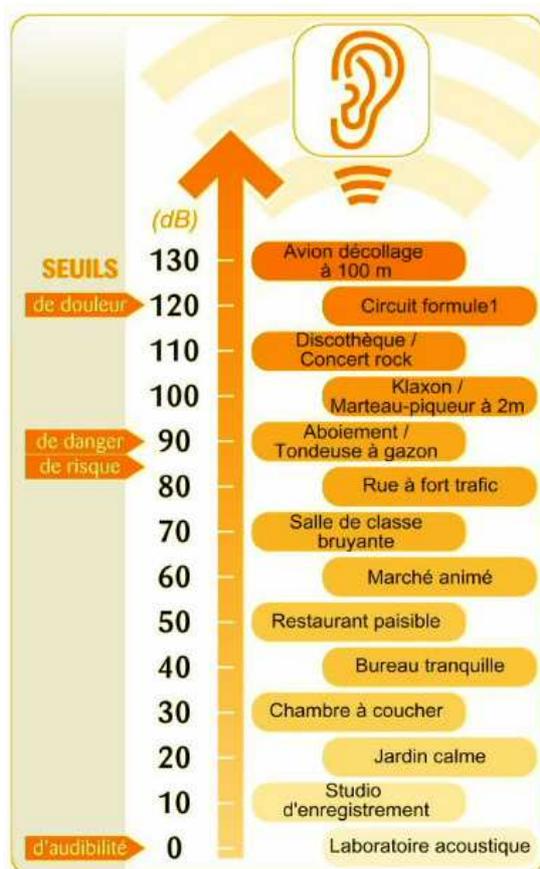


Vitesse de combustion de différents combustibles gazeux en proportion stœchiométriques dans l'air :

Nature du gaz combustible	Vitesse maximum de combustion laminaire
Hydrogène	3,5 m/s
Méthane	0,45 m/s
Butane	0,5 m/s
Acétylène	1,58 m/s

La flamme d'hydrogène se propage 7 fois plus vite que celle du gaz naturel : le risque de détonation ne peut donc pas être exclu.

Fuite – risque acoustique :



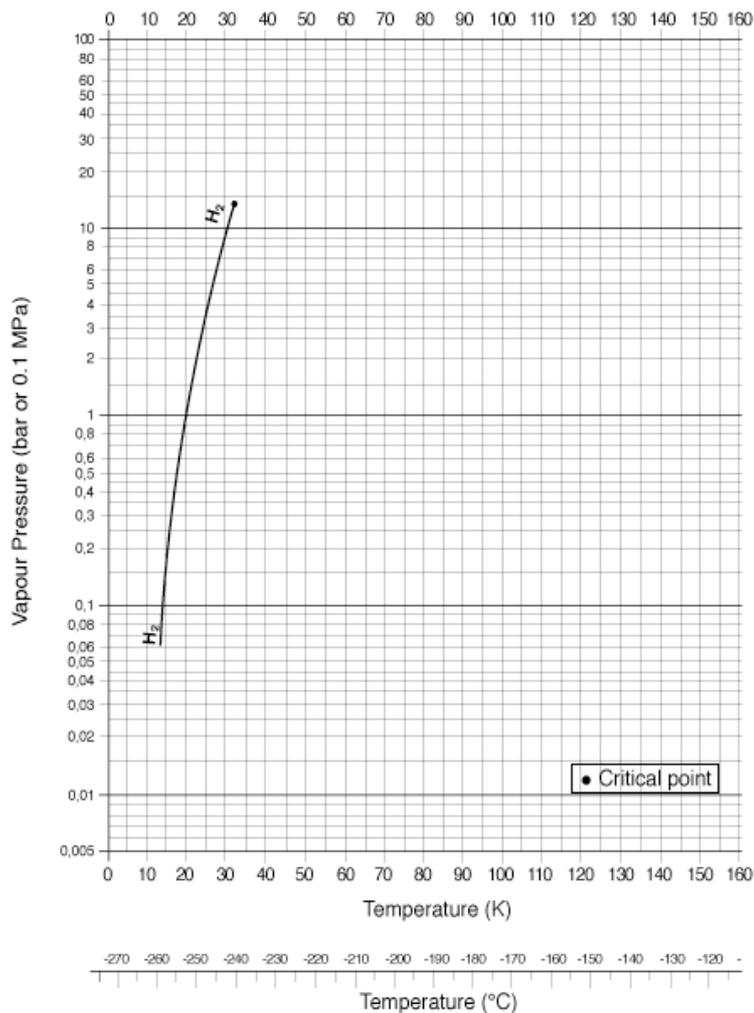
- Un cadre ouvert à 200 bars, équipé d'un orifice de sortie de lyre de 4mm fait un bruit de 130 dB ;
- Lors d'essais réalisés par la société Air Liquide, sur un tuyaux de 5mm et à une pression de 700 bars, les valeurs mesurées s'étendaient de 100 à 140 dB (la pression chutant très rapidement à 150 bars).

- En matière de protection pour les personnes et pour les installations, des dispositifs (automates de sécurité) détectent des fuites dès les plus basses pressions.

Des fuites atteignant 50 à 60 dB, ne présentent pas de risque pour les personnes à proximité, sauf en configuration « espace confiné ».

Source bruitparif.fr

Notion de cryogénie :



Identification de la pression de vapeur saturante du dihydrogène

Le dihydrogène peut donc être assimilé dans certaines conditions de températures à un liquide cryogénique. Force est en effet de constater qu'il peut être considéré comme un gaz liquéfié conservé à l'état liquide à basse température.

Les liquides cryogéniques sont susceptibles de provoquer des effets sur la peau similaires aux brûlures thermiques.

Faible débit de fuite :

Associé généralement à un défaut d'étanchéité, le faible débit de fuite est susceptible de provoquer une accumulation progressive de l'hydrogène.

En milieu confiné et/ou mal ventilé, cette accumulation permet la création d'un pré mélange qui est de nature à rentrer en déflagration voire en détonation.

A l'air libre, le coefficient de diffusion élevé de l'hydrogène permet généralement une dispersion rapide du combustible.

Fort débit de fuite :

Associé majoritairement à la rupture d'une canalisation alimentée par une enceinte sous pression avec défaut des organes de sécurité, le fort débit de fuite permet généralement la création d'un jet d'hydrogène. L'inflammation²² du jet d'hydrogène conduit alors à la composition d'un dard enflammé.

Symptômes liés à la diminution de la concentration atmosphérique en dioxygène :

Teneur de l'atmosphère en dioxygène à pression atmosphérique normale	Symptômes observés
17%	Baisse de la vision nocturne Accroissement de la quantité d'air inspiré Accélération du rythme cardiaque
16%	Vertiges
15%	Troubles de l'attention, du jugement et de la coordination Episodes d'apnée Fatigabilité Perte du contrôle de la motricité
12%	Fortes perturbations du jugement et de la coordination musculaire Perte de conscience Lésions cérébrales irréversibles
10%	Incapacité de se mouvoir Nausées Vomissements
6%	Respiration spasmodique Mouvements convulsifs Mort en 5 à 8 minutes

Le risque d'asphyxie interviendra préférentiellement dans les milieux confinés : le dihydrogène est en effet une très petite molécule disposant d'un coefficient de diffusion dans l'air faible², il aura donc tendance à monter³ et à se diluer très vite dans l'air en milieu non confiné.

Il convient toutefois de noter que si les conditions sont propices à l'apparition du risque d'asphyxie, la probabilité d'apparition du risque d'explosion est très importante. Cette probabilité est principalement due à la faible énergie d'inflammation du dihydrogène.

² Le coefficient de diffusion du dihydrogène dans l'air est de 0,61 cm²/s alors que celui du gaz naturel est de 0,16cm²/s. In *Fiche n°2.1 - les données de base sur l'hydrogène*, mars 2001, Association Française de l'Hydrogène (AFH2).

³ Le dihydrogène gazeux a une densité de 0,07. Il est donc beaucoup plus léger que l'air (d=1).

Tableau comparatif H2 - CH4 :

	HYDROGENE	METHANE
PCS (kJ/kg)	141 860	51 990
Densité gazeuse à 273K (kg/Nm ³)	0.08988	0.6512
Chaleur spécifique (Cp) 293K (J/kg K)	14 266	2237
Chaleur spécifique (Cv) 293K (J/kg K)	10 300	1714
Conductivité thermique du gaz (W/(mK))	0.1897	0.0328
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.) (K)	20.268	111.6
Température critique (K)	33.30	190.5
Température d'auto inflammation dans l'air (K)	858	813
Température de flamme dans l'air (K)	2 318	2148
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75	5,3 - 15
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65	6,3 -13,5
Energie minimale d'inflammation (J)	20	290
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³ de gaz)	2.02	7.03
Suppression de détonation (mélange stœchiométrique) (bars)	14.7	16,8
Coefficient de diffusion dans l'air (cm/s)	0.61	0,16
Vitesse de flamme dans l'air (cm/s)	260	38
Vitesse de détonation dans l'air (km/s)	2.0	1,8
Mélange stœchiométrique dans l'air (% vol)	29.53	9.48

Essais réalisés :

Dans le cas des bouteilles équipées de fusibles thermiques et au cours d'essais réalisés²⁴ par la société Air Liquide sur des bouteilles composites, l'éclatement des bouteilles s'est produit 5 minutes après avoir été exposées au feu (bouteille de type B100 remplie à 525 bars ou 700 bars).

En revanche une bouteille de type B100 remplie à une pression inférieure à 350 bars, n'éclate pas mais fuit.

Ces mêmes essais ont montré que l'ouverture du fusible thermique du robinet/détendeur d'un cadre composé de 4 bouteilles de type B142 provoquait²⁵ :

- soit une inflammation rapide du rejet d'hydrogène se caractérisant par une flamme de 10 à 12m et un flux thermique de 3kW/m² à 5,5m,
- soit une inflammation retardée du volume explosif formé par le pré mélange d'hydrogène et d'air se caractérisant par une surpression de 20mbar visible à 11m ou une surpression de 50mbar visible à 4,5m.

Pour un cadre composé de 4 bouteilles de type B142 à 525 bars, une fuite de 0,1mm sur une canalisation reliant le robinet/détendeur à l'une des enceintes est susceptible de créer une atmosphère explosive comportant 6,0% à 8,5% de hydrogène.

La déflagration résultant de l'inflammation du pré mélange conduit au niveau du cadre à :

- une surpression de 1 à 2 mbar,
- une boule de feu (voir tableau p.25) à la sortie du cadre.

ANNEXE V

NOTAS ET RENVOIS, REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE

- 1 *Fiche de Données de Sécurité AL067A relative à l'hydrogène*, juillet 2005, AIR LIQUIDE.
- 2 L'anoxie est la diminution importante de la quantité d'oxygène distribuée par le sang aux tissus.
- 3 *Guide d'intervention face au risque chimique*, page 258, édition 2008, FNSPF.
- 4 Le coefficient de diffusion de l'hydrogène dans l'air est de 0,61 cm²/s alors que celui du gaz naturel est de 0,16cm²/s. Cf. *Fiche n°2.1 - les données de base sur l'hydrogène*, mars 2001, Association Française de l'Hydrogène (AFH2).
- 5 L'hydrogène gazeux a une densité de 0,07. Il est donc beaucoup plus léger que l'air (d=1).
- 6 Les conditions normales de température et de pression sont données à 273,15°K et 1atm.
- 7 *Fiche n°7.1 - Mémento de l'hydrogène*, juin 2001, INERIS.
- 8 Une étude inhérente à l'analyse de 499 accidents ou incidents mettant en jeu de l'hydrogène a montré que seules 10% des fuites n'ont pas donné lieu à une inflammation. Cf. *fiche n°7.2 - Sécurité : transport, stockage et utilisation*, mars 2009, Association Française de l'Hydrogène (AFH2).
- 9 *Fiche n°2.1 - les données de base sur l'hydrogène*, mars 2001, Association Française de l'Hydrogène (AFH2).
- 10 La température de flamme de l'hydrogène dans l'air à 300°K (soit 26,85°C) est de 2318°K (soit 2044,85°C) alors que celle du gaz naturel est de 2148°K (soit 1874,85°C). Cf. *Fiche n°2.1 - les données de base sur l'hydrogène*, mars 2001, Association Française de l'Hydrogène (AFH2).
- 11 *Compte rendu débat INERIS – Associations relatif à l'hydrogène*, octobre 2008, INERIS.
- 12 *Propriétés de l'hydrogène*, AIR LIQUIDE (par JALLAIS Simon).
- 13 Seuil des Effets Irréversibles (arrêté du 29 septembre 2005).
- 14 Seuil des Effets Létaux (arrêté du 29 septembre 2005).
- 15 Seuil des Effets Létaux Significatifs (arrêté du 20 septembre 2005).
- 16 *Guide d'intervention face au risque chimique*, page 241, édition 2008, FNSPF.
- 17 *Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre* (page 10/166), juillet 2009, INERIS & *Fiche n°7.1 Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène*, juin 2001, INERIS.
- 18 *Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.*
- 19 *Fiche n°7.1 - Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène*, juin 2001, INERIS.
- 20 *Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre* (page 22/166), juillet 2009, INERIS.
- 21 *Fiche n°7.2 - Sécurité : transport, stockage et utilisation*, mars 2009, Association Française de l'Hydrogène (AFH2)
- 22 L'inflammation peut intervenir spontanément du fait de la faible énergie d'inflammation.

23 *Cadre de bouteilles H4-142 – Logistique 700 bars pour H2 énergie*, janvier 2013, AIR LIQUIDE (par VERGHADE)

24 *R&D sécurité des stockages composites hyperbares, 2013*, AIR LIQUIDE (par RUBAN Sidonie et BUSTAMANTE Lucas).

25 *Cadre de bouteilles H4-142 – Logistique 700 bars pour H2 énergie*, janvier 2013, AIR LIQUIDE (par VERGHADE).