
**Considérations fondamentales pour la
sécurité des systèmes à l'hydrogène**

Basic considerations for the safety of hydrogen systems

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 15916:2004](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004>



PDF – Exonération de responsabilité

Le présent fichier PDF peut contenir des polices de caractères intégrées. Conformément aux conditions de licence d'Adobe, ce fichier peut être imprimé ou visualisé, mais ne doit pas être modifié à moins que l'ordinateur employé à cet effet ne bénéficie d'une licence autorisant l'utilisation de ces polices et que celles-ci y soient installées. Lors du téléchargement de ce fichier, les parties concernées acceptent de fait la responsabilité de ne pas enfreindre les conditions de licence d'Adobe. Le Secrétariat central de l'ISO décline toute responsabilité en la matière.

Adobe est une marque déposée d'Adobe Systems Incorporated.

Les détails relatifs aux produits logiciels utilisés pour la création du présent fichier PDF sont disponibles dans la rubrique General Info du fichier; les paramètres de création PDF ont été optimisés pour l'impression. Toutes les mesures ont été prises pour garantir l'exploitation de ce fichier par les comités membres de l'ISO. Dans le cas peu probable où surviendrait un problème d'utilisation, veuillez en informer le Secrétariat central à l'adresse donnée ci-dessous.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 15916:2004](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004>

© ISO 2004

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax. + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Version française parue en 2006

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Aperçu des applications de la filière hydrogène	1
4.1 Infrastructure fondamentale pour les applications de la filière hydrogène	1
4.2 Composants types des systèmes à hydrogène	4
4.3 Carburant hydrogène	6
4.4 Effets sur l'environnement	6
5 Considérations relatives à la sécurité et liées à l'utilisation de l'hydrogène gazeux et liquide	6
5.1 Généralités	6
5.2 Dangers potentiels compte tenu des propriétés de l'hydrogène	7
5.3 Facteurs contribuant aux risques liés à la combustion	8
5.4 Facteurs de risques liés à la pression	10
5.5 Facteurs de risques liés à la température	11
5.6 Facteurs de risques liés à la fragilisation par l'hydrogène	11
5.7 Dangers pour la santé	12
5.8 Sensibilisation des personnels et leur formation pour une utilisation sûre de l'hydrogène	12
6 Propriétés fondamentales de l'hydrogène	13
6.1 Propriétés générales	13
6.2 Certaines propriétés thermophysiques	13
6.3 Caractéristiques fondamentales de combustion	15
7 Mesures de réduction et de maîtrise des risques	17
7.1 Mesures générales de réduction et de maîtrise du risque	17
7.2 Mesures de réduction des risques dès le stade de la conception	20
7.3 Mesures de réduction des risques d'inflammation et d'explosion	25
7.4 Considérations relatives à la détection	28
7.6 Considérations relatives au fonctionnement et à l'exploitation	35
7.7 Règles pratiques recommandées aux organismes concernés	40
Annexe A (informative) Propriétés de l'hydrogène	42
Annexe B (informative) Données relatives à la combustion de l'hydrogène	46
Annexe C (informative) Données relatives aux matériaux	49
Annexe D (informative) Composés destinés au stockage de l'hydrogène	54
Annexe E (informative) Termes et définitions	55
Bibliographie	69

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

Exceptionnellement, lorsqu'un comité technique a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales (ceci pouvant comprendre des informations sur l'état de la technique par exemple), il peut décider, à la majorité simple de ses membres, de publier un Rapport technique. Les Rapports techniques sont de nature purement informative et ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données fournies ne soient plus jugées valables ou utiles.

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

L'ISO/TR 15916 a été élaboré par le comité technique ISO/TC 197, *Technologies de l'hydrogène*.

Introduction

Le grand public n'est généralement pas familiarisé avec les applications industrielles des systèmes à hydrogène et ne dispose d'aucune expérience des nouveaux systèmes à hydrogène actuellement en cours de développement. Le présent Rapport technique s'intéresse plus particulièrement aux nouvelles applications de l'hydrogène dans le domaine de l'énergie. Il se propose de fournir des éléments de base qui permettent aux non-initiés au domaine technologique de saisir les questions de sécurité. Le présent document traite des applications dont l'intérêt repose sur les réactions chimiques de l'hydrogène et ne s'applique pas à celles fondées sur des procédés nucléaires.

Traditionnellement, l'hydrogène a été utilisé de manière intensive dans les industries pétrochimiques et chimiques et, dans une moindre mesure, dans les domaines de l'électronique, de la production de l'acier et de la verrerie ainsi que dans les industries d'hydrogénation des aliments. Dans le domaine de l'énergie, la seule application significative de l'hydrogène a été dans les programmes spatiaux. Mais cette situation est sur le point de changer dans la mesure où l'hydrogène semble plein de promesses en tant que vecteur énergétique efficace et combustible dont l'impact sur l'environnement est minime. Des systèmes de production d'hydrogène à partir de sources d'énergie primaire, comme le rayonnement solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, les hydrocombustibles et les combustibles fossiles, sont en cours de développement pour une utilisation dans des applications énergétiques dans les domaines du chauffage domestique et des bureaux, de la production d'électricité et du transport.

L'utilisation sans risque de l'hydrogène en tant que combustible constitue un objectif primordial de l'ISO dans la mesure où cette organisation cherche à faciliter l'émergence rapide de ces technologies de l'hydrogène. Un élément clé de l'utilisation de l'hydrogène en toute sécurité réside dans la prise de conscience de ses propriétés particulières liées à la sécurité et de l'existence de méthodes scientifiques acceptables permettant de maîtriser les risques associés à l'utilisation de l'hydrogène. Le présent Rapport technique décrit les phénomènes dangereux associés à l'utilisation et à la présence d'hydrogène, examine les propriétés de l'hydrogène liées à la sécurité et soulève un débat général sur les méthodes adoptées pour la réduction des risques associés à l'utilisation de l'hydrogène. Le but du présent Rapport technique est de favoriser l'acceptation des technologies de l'hydrogène en mettant à la disposition des autorités de réglementation et de contrôle des éléments d'information privilégiés et en sensibilisant le grand public aux questions de sécurité liées à l'utilisation de l'hydrogène.

L'élaboration de Normes internationales répondait à l'un des besoins identifiés dans le plan d'activités de l'ISO/TC 197. En effet, la publication de normes spécifiques traitant de l'hydrogène et permettant une mise en œuvre précoce favorisant l'évolution rapide de technologies émergentes permet d'éliminer les obstacles au commerce international et de simplifier le processus de réglementation déjà complexe. Le présent Rapport technique est l'un des nombreux documents élaborés ou en cours d'élaboration par l'ISO pour répondre aux besoins énumérés dans le plan d'activités de l'ISO/TC 197. Les détails des exigences de sécurité associées aux applications de la filière hydrogène font l'objet de Normes internationales distinctes. Le présent Rapport technique fournit une base informative de référence à ces normes spécifiques et constitue une source commune et cohérente d'informations sur les problèmes de sécurité associés à l'hydrogène. Il convient que ce rapport permette de réduire les redondances et les incohérences éventuelles dans lesdites normes spécifiques.

Les considérations examinées dans le présent Rapport technique sont d'ordre général et cherchent à couvrir l'ensemble des aspects liés à la sécurité dans le domaine de l'hydrogène. Le degré de mise en œuvre de ces principes généraux dépendra des modes d'application spécifiques (tels que les conditions d'utilisation et les quantités d'hydrogène impliquées et le mode d'utilisation de l'hydrogène). Dans le cadre de leurs activités, les industries utilisatrices peuvent tirer profit d'une grande partie des principes généraux énoncés dans le présent document. Le grand public ne sera probablement pas tenu de disposer de ce niveau de connaissances pour la mise en œuvre en toute sécurité d'un système à hydrogène. Pour les appareils d'usage commun actuellement, il est d'ores et déjà certain qu'une bonne conception combinée à une installation réalisée avec soin et dans les règles de l'art permettra de réduire les risques à des niveaux jugés acceptables par le public. Les fabricants des appareils et systèmes à hydrogène seront amenés à tenir compte de ces principes généraux afin d'élaborer et d'adapter des éléments d'information spécifiques et suffisants en vue de la mise en œuvre de leurs appareils dans leur environnement d'utilisation où ils doivent être utilisés et pour les utilisateurs auxquels ils sont destinés. Les lecteurs sont encouragés à garder ces points présents à l'esprit en prenant connaissance des informations que leur livre le présent document. L'hydrogène a fait l'objet d'une utilisation en toute sécurité dans de nombreuses applications diverses et depuis plusieurs années. L'adhésion aux principes énoncés dans le présent Rapport technique peut contribuer à poursuivre les succès enregistrés dans le domaine de l'utilisation de l'hydrogène.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 15916:2004](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004>

Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à l'hydrogène

1 Domaine d'application

Le présent Rapport technique présente des lignes directrices relatives à l'utilisation de l'hydrogène en phases gazeuse et liquide. Il identifie les questions fondamentales liées à la sécurité et aux risques, et décrit les propriétés significatives de l'hydrogène eu égard à la sécurité. Les détails des prescriptions de sécurité associées aux applications de la filière hydrogène sont traités dans des Normes internationales distinctes.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 11114-4:2005, *Bouteilles à gaz transportables — Compatibilité des matériaux des bouteilles et des robinets avec les contenus gazeux — Partie 4: Méthodes d'essai pour le choix de matériaux métalliques résistants à la fragilisation par l'hydrogène*

ISO 14687:1999, *Carburant hydrogène — Spécification de produit*, et le Rectificatif technique 1:2001

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'Annexe E s'appliquent.

4 Aperçu des applications de la filière hydrogène

4.1 Infrastructure fondamentale pour les applications de la filière hydrogène

4.1.1 Catégories d'infrastructure

Théoriquement, l'objet des applications de la filière hydrogène peut être classé en catégories relevant

- a) de la production,
- b) du stockage et du transport, et
- c) de l'utilisation de l'hydrogène.

Certaines applications peuvent impliquer l'ensemble des trois catégories.

4.1.2 Production

Le principal moyen de production en vrac de l'hydrogène met en œuvre actuellement des procédés chimiques tels que le reformage à la vapeur du gaz naturel, la production d'hydrogène par réaction de métaux avec des acides et l'électrolyse de l'eau. À l'avenir, des procédés photochimiques et des plantes sélectionnées génétiquement peuvent également constituer des moyens pratiques de production d'hydrogène.

Divers moyens de production d'hydrogène sont mis en œuvre pour des applications particulières. Par exemple certaines applications cherchent à réduire au minimum le stockage ou les risques en fournissant à la demande de l'hydrogène (ou de l'oxygène avec de l'hydrogène sous forme de sous-produit). Plusieurs technologies d'électrolyse sont en cours de développement à cet effet. Les électrolyseurs sont capables de fournir une qualité d'hydrogène et d'oxygène ultra pure dont ont besoin les activités de recherche.

4.1.3 Stockage et transport

4.1.3.1 Généralités

L'hydrogène dont les sites de production et d'utilisation sont différents et éloignés doit être mis en œuvre de manière à pouvoir facilement être stocké et transporté jusqu'au lieu de consommation. Par rapport aux combustibles conventionnels, la faible masse volumique de l'hydrogène dans des conditions ambiantes et sa basse température d'ébullition rendent difficile le stockage de quantités suffisantes correspondant aux besoins dans les secteurs d'application types. Les méthodes éprouvées destinées à l'augmentation de la densité de stockage de l'hydrogène supposent la manipulation de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé ou en phase liquide et réfrigéré, avant de procéder ensuite à son transport et à sa livraison par route, par voie d'eau ou par hydrogénoduc. Le transport de l'hydrogène par voie commerciale aérienne n'est autorisé qu'en très faibles quantités. Les hydrogénoducs ne sont utilisés que dans les milieux et sites industriels. Dans le passé, l'hydrogène était utilisé à large échelle en tant que composant du «gaz de ville» destiné à l'éclairage des rues. Actuellement, la distribution de l'hydrogène ne s'effectue généralement plus par l'intermédiaire de canalisations pour les applications publiques et commerciales. Mais une utilisation plus généralisée de l'hydrogène peut contribuer à changer cette situation.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-505e4f84171/iso-tr-15916-2004>

4.1.3.2 Stockage et transport en phase gazeuse

Lorsqu'il s'agit de quantités d'hydrogène réduites à moyennes, l'hydrogène gazeux est comprimé et stocké dans des réservoirs sous haute pression. Les réservoirs conventionnels en aluminium et en acier sont couramment utilisés pour le stockage de l'hydrogène à des pressions maximales de 40 MPa¹⁾. Des remorques porte-tubes, conçues pour le service routier, assurent le transport de volumes qui varient de 300 000 litres à 500 000 litres.

4.1.3.3 Stockage et transport en phase liquide

Une autre méthode de stockage de l'hydrogène passe par la condensation de l'hydrogène et son passage à l'état liquide ou à l'état semi-solide (hydrogène solide et liquide mélangé). Ce procédé nécessite la réfrigération de l'hydrogène à des cryotempératures (autour de 20 K) afin d'atteindre l'état liquide, et à moins 14 K pour obtenir de l'hydrogène à l'état semi-solide. Jusqu'à présent, l'hydrogène semi-solide n'a été utilisé que dans le domaine aérospatial comme propergol et l'économie de la production ne milite pas en faveur de son utilisation à large échelle. Le stockage de l'hydrogène à des cryotempératures requiert de réduire au minimum l'exposition de ce fluide aux conditions de chaleur ambiantes afin d'éviter des pertes excessives d'hydrogène. La meilleure isolation thermique est assurée par un réservoir à double enveloppe à vide isolant selon un principe assimilé à celui de la bouteille thermos isolante. Aucune isolation n'étant parfaite

1) Tout au long du présent Rapport technique, il est fait souvent référence à des pressions exprimées en kilopascals (kPa) et mégapascals (MPa), ainsi qu'à des températures exprimées en kelvins (K), avec des valeurs pouvant paraître insolites. Afin d'aider les lecteurs à se situer par rapport aux valeurs exprimées dans ces unités, le présent document fait mention de valeurs connues de tous. La pression atmosphérique au niveau de la mer est de 101,3 kPa ou 0,1 MPa (soit une pression absolue de 14,7 livres par inch carré), et la température de congélation de l'eau est de 273,15 K (0 °C ou 32 °F).

et sans captage et reliquéfaction, on ne peut qu'accepter les pertes lentes d'hydrogène dans l'atmosphère, à moins que le débit d'utilisation soit supérieur au débit d'évaporation ou que soit mis en place un système de gestion des évaporats. Le transport de l'hydrogène liquide est réalisé dans des citernes à double enveloppe à vide isolant par camion, sur rail ou par bateau-citerne, et il doit être alors transvasé dans des récipients de stockage cryogénique à double enveloppe à vide isolant à la livraison aux sites d'utilisation. Des systèmes de stockage d'une capacité de 3 700 000 litres sont mis en œuvre dans les applications aérospatiales. Cependant, le stockage de l'hydrogène liquide à des cryotempératures ne peut pas se prolonger indéfiniment à moins d'en maintenir la réfrigération, solution non économique pour la plupart des applications. L'hydrogène liquide est soit utilisé, soit il finit par se perdre dans l'environnement.

4.1.3.4 Autres formes de stockage

Les composés chimiques riches en liaisons hydrogènes, les mélanges d'hydrogène et d'autres combustibles, les hydrures et les matériaux à haute adsorption superficielle d'hydrogène peuvent trouver des applications dans les systèmes de stockage de l'hydrogène (voir Annexe D). Un dispositif appelé reformeur peut être utilisé pour obtenir de l'hydrogène à partir d'un composé de stockage. Lorsque ces systèmes mettent en œuvre d'autres produits chimiques que l'hydrogène, il convient d'appliquer des mesures de sécurité spéciales et spécifiques aux matériaux, outre celles applicables à l'hydrogène. Ces aspects ne s'inscrivent pas dans le cadre du présent Rapport technique.

4.1.3.5 Systèmes de stockage pour véhicules

Les quantités d'hydrogène et le poids des enceintes de confinement destinées aux systèmes de stockage des gaz sous haute pression ou à des cryotempératures constituent des défis en termes de conception des réservoirs de stockage de combustibles pour véhicules. Pour réduire le volume et le poids des réservoirs de carburant proposés pour les véhicules à hydrogène, des matériaux composites légers sont en cours de développement. Actuellement, des pressions de confinement de 35 MPa sont en cours d'utilisation sur les véhicules équipés de piles à combustible. Des technologies permettant d'atteindre des pressions de confinement plus élevées allant jusqu'à 70 MPa et mettant en œuvre des composites sont en cours de développement.

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-5157d81d3116/iso-tr-15916-2004)

[5157d81d3116/iso-tr-15916-2004](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-5157d81d3116/iso-tr-15916-2004)

4.1.4 Applications faisant appel à l'hydrogène

L'hydrogène, vecteur d'énergie, est utilisé dans les piles à combustible, les moteurs à combustion interne, les turbines, les propulseurs de fusée et dans tous les domaines mettant en œuvre ces composants.

Dans ce domaine de l'énergie, une variété d'applications commerciales fondées sur les électrolyseurs et les systèmes à piles à combustible utilisant l'hydrogène verra bientôt le jour. Elle s'étend des petits systèmes portables destinés à remplacer les batteries, telles les piles «D», aux systèmes de 1 kW, 10 kW et davantage conçus pour des réseaux de distribution de l'énergie à longue distance ou décentralisés nécessaires à l'alimentation électrique domestique et des villages éloignés et isolés ou encore pour augmenter la capacité du réseau électrique. Les systèmes portables s'appuient généralement sur une source d'alimentation à l'hydrogène remplaçable ou rechargeable. Des systèmes plus importants sont prévus dans le cadre de sources d'énergie intégrées et renouvelables, telles que les systèmes d'énergie éolienne ou photovoltaïques. Ces derniers systèmes sont à la fois producteurs et consommateurs d'hydrogène dans la mesure où ils convertissent l'électricité en hydrogène et stockent l'énergie avant de la reconvertir ensuite en électricité, selon les besoins. À cet effet, un électrolyseur convertit de l'énergie renouvelable en hydrogène. Ensuite, l'hydrogène est mis en œuvre pour les besoins de stockage et utilisé en association avec une pile à combustible ou avec une unité de cogénération pour produire de l'électricité à la demande. De tels systèmes peuvent être en outre intégrés pour le captage de la chaleur perdue en vue de son utilisation pour le chauffage ou dans l'industrie. Ces applications mettent en jeu un composant qui accomplit la fonction primaire et des composants chargés d'assurer le contrôle, la sûreté, l'alimentation et le stockage de l'hydrogène, ou de soutenir la fonction primaire.

4.2 Composants types des systèmes à hydrogène

4.2.1 Généralités

Un système générique à hydrogène comporte des composants primaires et auxiliaires qui font partie intégrante des dispositifs de sécurité de l'hydrogène. À titre d'exemple, les propulseurs de fusée destinés aux applications aérospatiales, les empilages de cellules utilisés dans le cadre des piles à combustible conçues pour des applications énergétiques, les moteurs à combustion interne employés dans le domaine des transports et les convertisseurs catalytiques des fourneaux de cuisine à usage domestique sont des composants qui assurent des fonctions primaires.

Quant aux composants auxiliaires qui assurent un soutien essentiel des fonctions primaires, ils peuvent disposer en totalité ou en partie des éléments suivants:

- a) un moyen de stockage d'hydrogène ou une source d'alimentation en hydrogène, et un moyen de stockage de comburant ou une source d'alimentation en comburant;
- b) des canalisations de distribution de fluide pour faire parvenir l'hydrogène et le comburant au système réactionnel;
- c) des dispositifs régulateurs du débit;
- d) des systèmes de protection contre les surpressions intégrés aux composants a), b) et c) dès le stade de la conception;
- e) des détecteurs.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

4.2.2 Capacités de stockage

Il convient que la conception et la fonction des capacités de stockage et de leurs composants reflètent le type d'exploitation envisagée, par exemple les réservoirs de gaz à haute pression ou ceux destinés aux liquides maintenus à des cryotempératures. Des volumes supérieurs à 7 500 litres, dans des conditions normales, sont stockés généralement à l'air libre ou dans des enceintes spécialement conçues à cet effet. Il convient que la fabrication de ces capacités réponde aux prescriptions des codes nationaux spécifiques aux récipients sous pression. Les capacités de stockage de l'hydrogène à des cryotempératures mettent en œuvre des éléments d'isolation ou des enveloppes à vide isolant. Il est nécessaire de maintenir le vide à l'aide de pompes à vide.

4.2.3 Canalisations de distribution du fluide, tuyauterie, raccords et joints d'étanchéité

Il est nécessaire que les tuyauteries et les joints d'étanchéité soient adaptés au système à hydrogène pendant toute sa durée de vie. Des canalisations en acier inoxydable sont généralement utilisées. L'hydrogène passe par perméation à travers la majeure partie des matériaux et chaque petite brèche dans le système se traduit facilement par des fuites d'hydrogène. Ainsi, il est préférable d'utiliser des assemblages soudés là où toute fuite est interdite. S'il est nécessaire d'ouvrir périodiquement un raccord ou un joint, l'usage de certains types de détecteurs d'hydrogène ou de détecteurs de flammes est souhaitable, lorsqu'une perméation ou fuite pourrait conduire à l'accumulation d'un mélange inflammable.

4.2.4 Dispositifs régulateurs de débit

Des composants divers sont utilisés pour la régulation du flux d'hydrogène à l'intérieur du système. Les vannes, clapets antiretours et régulateurs constituent les composants mécaniques les plus communément utilisés. Ils peuvent être à commande manuelle ou à distance et mettent en œuvre des actionneurs électriques ou pneumatiques. Les actionneurs doivent être spécialement conçus à cet effet de manière à ne pas constituer une source d'inflammation de l'hydrogène libéré. Les clapets antiretours sont destinés à empêcher un reflux indésirable. Les régulateurs permettent le contrôle de la pression à l'intérieur d'un circuit. Les dispositifs de régulation font appel à des capteurs associés au fluide, tels que les manomètres, débitmètres, indicateurs de niveau de liquide, ainsi qu'à d'autres systèmes de contrôle et de commande.

4.2.5 Dispositifs de protection contre les surpressions

Il convient que les récipients et les tuyauteries qui confinent effectivement ou risquent éventuellement de confiner l'hydrogène soient protégés contre les surpressions par l'intermédiaire d'un dispositif de protection contre les surpressions. Pour donner un exemple de situations qui peuvent conduire à une surpression dans un système à hydrogène, citons le cas d'un incendie ou d'une défaillance d'un régulateur à l'origine d'un passage d'hydrogène haute pression dans un compartiment basse pression. Le système de protection contre les surpressions intègre généralement des soupapes de décharge et des disques de rupture qui déchargent l'hydrogène pressurisé vers une ligne d'évent. Une soupape de décharge est constituée d'un clapet maintenu fermé à l'aide d'un ressort qui s'ouvre dès que la pression de tarage de la soupape est dépassée. Un disque de rupture est un dispositif similaire sauf que la décharge de l'hydrogène requiert le déchirement d'une membrane sensible à la pression. Ce dispositif est généralement mis en œuvre en parallèle avec la soupape de décharge, qu'il complète au titre de dispositif à sécurité intrinsèque contre les surpressions. Après déchirement de la membrane, le disque de rupture doit être remplacé. Même l'espace sous vide, au niveau des canalisations à double enveloppe à vide isolant d'un système cryogénique, doit faire l'objet d'une protection contre les défaillances susceptibles de conduire à l'entrée d'hydrogène sous forte pression.

4.2.6 Détecteurs

À l'extérieur du système à hydrogène, le système de contrôle et de commande peut surveiller et détecter la présence d'hydrogène à l'état gazeux ou d'une flamme d'hydrogène. Diverses technologies permettent la détection du gaz hydrogène. Les détecteurs d'hydrogène sont généralement installés au-dessus d'un point de fuite redouté où l'hydrogène pourrait s'accumuler, ainsi qu'au niveau de l'entrée des conduites de ventilation. Des caméras à infrarouge (IR) peuvent détecter la présence de chaleur et offrent un champ de vision étendu. Les détecteurs de rayonnement ultra-violet (UV) servent tout particulièrement à détecter la présence de flamme d'hydrogène, mais cela exige un réglage minutieux de l'axe optique du champ de vision des détecteurs dans la mesure où la lumière solaire ou des activités de soudage peuvent provoquer le déclenchement intempestif de ces détecteurs.

4.2.7 Autres composants

ISO/TR 15916:2004

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-502660d10419/iso-tr-15916-2004>

Les systèmes à hydrogène peuvent mettre en œuvre des convertisseurs catalytiques et des «sorbeurs» destinés à éliminer l'hydrogène indésirable ou en excès. Des filtres peuvent être installés pour éliminer les impuretés de l'hydrogène provenant du système lui-même ou de ses auxiliaires. Par exemple les empilages de membranes échangeuses de protons (MEP) utilisés lors des opérations d'électrolyse et dans les piles à combustible nécessitent l'emploi d'eau pure préalablement filtrée et déminéralisée avec soin. Les systèmes à hydrogène peuvent nécessiter l'utilisation d'échangeurs thermiques, de refroidisseurs et de radiateurs.

4.2.8 Considérations relatives aux conditions extérieures au système

Les éléments inhérents à toute conception de systèmes à hydrogène sont

- a) les aspects liés aux conditions de fonctionnement et d'exploitation du système,
- b) le fonctionnement à sécurité intégrée qui se justifie par les modes de défaillances attendus, et
- c) les considérations à long terme qui couvrent la durée de vie du système en service.

Par exemple il faut que les systèmes fixes à hydrogène soient installés conformément aux exigences spécifiques déterminées par des règles nationales de sécurité. Ces règles identifient les exigences de construction et de choix des matériaux pour les structures, compte tenu du volume d'hydrogène, de son état physique (gazeux ou liquide) et du lieu de stockage souhaité. Il convient que la conception des systèmes à hydrogène prévoie à l'avance toutes les circonstances possibles d'occurrence des défaillances pendant leur durée de vie en service et de placer le système en état de sécurité quel que soit le mode raisonnable de défaillance.

4.3 Carburant hydrogène

Le carburant hydrogène contient des impuretés introduites par le procédé de fabrication ou introduites pendant le stockage et lors de la manipulation après la phase de production. La quantité et le type d'impuretés peuvent être préjudiciables aux systèmes consommateurs d'hydrogène; ainsi, l'ISO 14687:1999 a été publiée pour spécifier les caractéristiques de qualité du carburant hydrogène, afin de garantir l'uniformité du carburant hydrogène produit pour les véhicules, les appareils ménagers ou d'autres applications en stations-service ou en ravitaillement. Cette spécification classe le carburant hydrogène en trois types, I, II et III, correspondant respectivement à l'hydrogène gazeux, liquide et semi-solide. Le type I est lui-même divisé en catégories A, B et C selon l'ordre de croissance des degrés de pureté. Plus les impuretés sont réduites, plus les coûts de stockage et de manipulation augmentent. L'ISO 14687:1999 spécifie les niveaux d'impuretés pour l'eau (H₂O), les hydrocarbures totaux (HT), l'oxygène (O₂), l'argon (Ar), l'azote (N₂), l'hélium (He), le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde de carbone (CO), le mercure (Hg), le soufre (S), ainsi que pour les particules présentes en permanence.

4.4 Effets sur l'environnement

L'impact sur l'environnement dû à l'utilisation des systèmes à hydrogène semble minime. À de rares exceptions, l'eau pure constitue le seul produit réactionnel. Les systèmes aérobies brûlant l'hydrogène à hautes températures constituent une exception et peuvent produire des oxydes d'azote (NO_x). Les piles à combustible MEP et les électrolyseurs ne produisent que de l'eau, et certains systèmes combinant un électrolyseur et une pile à combustible peuvent récupérer la plus grande partie de l'eau produite pour une réutilisation ultérieure. La formation d'eau à partir des réactions hydrogène-oxygène est bien connue des observateurs extérieurs des lancements des navettes spatiales de la NASA, qui ont constaté, dans des conditions de vent favorables, de la pluie par grand ciel bleu. À brève ou longue échéance, en supposant que les véhicules à hydrogène deviennent le moyen de transport le plus répandu, soit les zones d'utilisation massive de ces véhicules, telles que les villes, connaîtront une augmentation de l'humidité atmosphérique, soit il sera nécessaire de prévoir que les véhicules à hydrogène condensent et capturent leurs émissions d'eau. L'élimination des polluants (tels que le CO, CO₂ et NO_x), émis sous forme de sous-produits de la réaction, est l'un des avantages essentiels de l'utilisation des systèmes à hydrogène.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-50f5cdf84d71/iso-tr-15916-2004>

5 Considérations relatives à la sécurité et liées à l'utilisation de l'hydrogène gazeux et liquide

5.1 Généralités

Les propriétés singulières de l'hydrogène, qui en font un vecteur énergétique ou un combustible précieux, méritent une conception et une mise en œuvre judicieuse des systèmes à hydrogène afin d'éviter que ceux-ci n'induisent accidentellement des phénomènes dangereux.

Le comportement de l'hydrogène, combiné aux spécificités d'un système à hydrogène, détermine la nature des risques auxquels peuvent être confrontés les opérateurs. Par exemple selon que le système fonctionne avec de l'hydrogène haute pression ou cryogénique, cela définit la nature des dangers potentiels.

Les principaux phénomènes dangereux et interrogations associés aux systèmes à hydrogène peuvent être classés par ordre d'importance de la manière suivante:

- a) combustion;
- b) pression;
- c) basse température;
- d) fragilisation par l'hydrogène;
- e) exposition.

La liste ci-dessus souligne les points qu'il convient d'examiner et d'étudier avec attention en matière de conception et de fonctionnement des systèmes à hydrogène. L'exposition a été classée en dernière position dans la mesure où les conséquences que peut avoir chacun des quatre premiers phénomènes dangereux cités dans la liste sont de loin plus graves que celles dues à l'exposition. Il est à signaler que cette liste ne mentionne pas les phénomènes dangereux spécifiques à un système ou ne tient pas compte de la possibilité d'interaction entre les différents éléments cités dans la liste pour constituer un danger de dimension globale. Il convient d'envisager les phénomènes dangereux et les questions afférentes lors de l'évaluation des risques liés à l'utilisation d'hydrogène.

En effet, l'exploitation et le fonctionnement des systèmes à hydrogène peuvent mobiliser un grand nombre de personnes, et il convient que l'effort à déployer s'inscrive dans le cadre d'un effort commun de toute une équipe. Il y a lieu que chaque personne impliquée au niveau de l'utilisation de l'hydrogène soit bien au fait des propriétés de l'hydrogène liées à la sécurité et des phénomènes dangereux associés à ces caractéristiques.

5.2 Dangers potentiels compte tenu des propriétés de l'hydrogène

5.2.1 Généralités

Une discussion portant sur la correspondance entre les propriétés de l'hydrogène et les phénomènes dangereux potentiels qui leur sont associés permet d'avoir un aperçu des problèmes de sécurité. Alors que les préoccupations, en matière de phénomènes dangereux liés à la combustion, sont communes à tous les systèmes à hydrogène, les conditions d'apparition de ces phénomènes dangereux varient selon que l'hydrogène est utilisé sous forme liquide ou gazeuse.

En termes de sécurité générale, certaines propriétés de l'hydrogène à l'état gazeux et liquide sont abordées ci-après. Des informations complémentaires sur les propriétés de l'hydrogène gazeux et liquide liées à la sécurité en général sont résumées dans l'Article 6, et l'Annexe A produit des tableaux mentionnant des propriétés usuelles.

5.2.2 Hydrogène gazeux

ISO/TR 15916:2004

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-5075cd84d71/iso-tr-15916-2004)

[5075cd84d71/iso-tr-15916-2004](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee-5075cd84d71/iso-tr-15916-2004)

L'hydrogène sous forme gazeuse ne présente ni couleur ni odeur caractéristique. De tous les gaz, la molécule d'hydrogène est la plus petite et la plus légère. Par conséquent, l'hydrogène gazeux traverse facilement par perméation les matériaux, passe à travers les interstices les plus fins, se diffuse plus rapidement dans l'air ambiant et présente une plus grande flottabilité que les autres gaz. Ces caractéristiques font que l'hydrogène libéré monte et se diffuse rapidement; cependant, en milieu confiné, il peut s'accumuler aux points les plus élevés.

Les fuites étant une préoccupation permanente, les récipients et circuits de tuyauteries d'hydrogène exigent l'installation de dispositifs d'étanchéité. En outre, les fuites d'hydrogène sont difficiles à déceler à l'oreille seule dans la mesure où elles n'émettent aucun bruit audible. Il a été prouvé que l'hydrogène peut traverser lentement et par perméation les matériaux en milieu confiné. La vitesse de perméation varie en fonction des différents types de matériaux. Pour les métaux tels que l'acier et à température ambiante, cette vitesse est extrêmement faible et des quantités insignifiantes mettent longtemps à se diffuser ainsi. Il convient d'observer une certaine prudence lorsqu'il s'agit de polymères, lesquels autorisent une perméation plus importante et des quantités significatives d'hydrogène peuvent donc ainsi s'accumuler, lorsque le flux d'hydrogène pénètre dans un espace réduit non aéré. L'hydrogène gazeux dissous dans un liquide peut passer par perméation à travers les matériaux de fabrication de récipients contigus.

En raison de sa faible masse volumique dans les conditions ambiantes, le stockage et le transport de l'hydrogène gazeux s'effectuent généralement à des pressions élevées.

5.2.3 Hydrogène liquide

L'hydrogène liquide est pâle d'apparence avec une teinte légèrement bleuâtre. Sa température d'ébullition est extrêmement basse et il présente une faible masse volumique, une faible capacité calorifique et un coefficient élevé de dilatation volumique (cubique), lorsqu'il est porté à une température de gazéification.

L'hydrogène liquide, compte tenu de sa basse température d'ébullition qui se situe à 20,3 K, bout ou s'évapore instantanément lorsqu'il est exposé à ou déversé dans un environnement à température ambiante (300 K). L'échauffement de l'hydrogène liquide et sa transformation en gaz à température ambiante peuvent générer des pressions élevées dans un milieu confiné.

En outre, en cas d'exposition à l'hydrogène liquide, la basse température de celui-ci provoque la condensation et la solidification de tous les gaz, à l'exception de l'hélium. Des fuites d'air, d'azote ou d'autres gaz à travers les dispositifs d'étanchéité des vannes peuvent être à l'origine de plusieurs phénomènes dangereux, en cas d'exposition directe à l'hydrogène liquide. Les gaz solidifiés peuvent boucher les canalisations et les orifices et bloquer les vannes. La réduction en volume des gaz qui se sont condensés peut créer un vide susceptible de causer l'afflux de davantage de gaz selon un processus dit de cryopompage. En cas de fuite persistante et prolongée, des quantités importantes de produits peuvent s'accumuler et prendre la place de l'hydrogène liquide. À un certain point, et en cas de réchauffement du système pour raison de maintenance, ces produits solidifiés se transforment de nouveau en gaz, en générant éventuellement des pressions élevées ou des mélanges inflammables.

À l'extérieur du système à hydrogène liquide, une condensation des gaz, comme l'air, et leur transformation en solides et en liquides, peuvent se produire sur les surfaces externes des canalisations et capacités non isolées et contenant de l'hydrogène liquide. Le condensat liquide s'écoule à la manière de l'eau à l'état liquide. Et si jamais l'oxygène contenu dans l'air liquéfié entrait en contact avec des matières inflammables, un incendie ou une explosion pourrait se déclencher.

5.3 Facteurs contribuant aux risques liés à la combustion

5.3.1 Considérations relatives à la combustion

Le principal risque que présentent les systèmes à hydrogène réside dans la combustion non maîtrisée de l'hydrogène qui s'échappe accidentellement. Ceci est d'autant plus vrai que le risque de fuites et de formation de mélanges inflammables est important, que ces mélanges sont facilement inflammables et que l'importante énergie ainsi dégagée peut être à l'origine d'un incendie ou d'une explosion.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/03fac04a-8f2b-4dbc-8cee->

Pour que l'hydrogène s'enflamme, deux éléments complémentaires doivent être présents: un comburant, tel que l'air, et une source d'inflammation. Chacun des facteurs indispensables à la combustion (un combustible, un comburant et une source d'inflammation) peut être représenté par l'un des trois côtés d'un triangle, selon un concept dit de «triangle du feu». Les mélanges d'hydrogène et de comburants sont inflammables sur une large plage de concentrations, de pressions et de températures. Ces mélanges sont facilement inflammables dans des conditions proches de la stœchiométrie. Différents mécanismes physiques communs (flammes nues, surfaces chaudes, frottement, etc.) peuvent constituer des sources d'inflammation, parmi lesquelles figurent également les étincelles d'origine électrostatique dont le niveau énergétique est inférieur aux limites de la perception humaine. Étant donné la facilité avec laquelle s'enflamment les mélanges d'hydrogène et de comburants, la plupart des méthodes de réduction du risque de combustion de l'hydrogène s'appuient sur la séparation de l'hydrogène et des comburants.

La combustion de l'hydrogène se produit de plusieurs manières: un incendie, une déflagration et une détonation. Chaque phénomène présente des dangers potentiels et dépend de la manière dont l'hydrogène est exposé à un comburant. Dans les applications terrestres types, l'air est un comburant omniprésent. Les électrolyseurs et certains systèmes de piles à combustible peuvent être des sources potentielles de mélange d'oxygène pur ou enrichi et d'hydrogène.

L'Annexe B présente des données de base concernant la combustion de l'hydrogène.

5.3.2 Incendie

Lorsqu'elle est entourée d'un comburant tel que l'air, une source d'hydrogène, par exemple une fuite, peut s'enflammer pour produire une flamme selon un processus le plus souvent similaire à un bec Bunsen. En fonction de la vitesse avec laquelle le flux d'hydrogène s'écoule de la source, l'importance des flammes peut varier de celles d'une petite bougie à celles dégagées par de gros moteurs à réaction à haute pression. Un feu au niveau d'une zone étanche provoque une montée en pression. Contrairement aux combustibles hydrocarbonés tels que l'essence, dont le rayonnement se manifeste en grande partie sous forme de lumière

visible et de chaleur, la flamme d'hydrogène rayonne peu et dégage nettement moins de chaleur; elle est quasiment invisible et émet un rayonnement ultraviolet dont l'effet est comparable à un coup de soleil. Du fait des gradients thermiques dans la flamme, la lumière projette parfois une ombre.

Dès que les éléments du triangle du feu sont réunis, une inflammation de l'hydrogène est possible. La chaleur dégagée par une inflammation non maîtrisée de l'hydrogène peut avoir un effet très destructeur sur le milieu environnant. Dans une zone étanche, l'inflammation d'un mélange hydrogène-air peut provoquer une montée en pression 8 fois supérieure à la pression initiale pour un mélange stœchiométrique. Outre le dégagement d'énergie et gaz chauds, ces propriétés ont plusieurs autres effets en termes de sécurité. Tout d'abord, la combustion de l'hydrogène est le plus souvent imperceptible à l'œil nu et à la lumière artificielle ou du jour. Un autre élément important est que l'homme ne perçoit physiquement la chaleur que suite à un contact direct avec les gaz de combustion. En outre, il convient de prendre également en considération l'exposition au rayonnement ultraviolet en cas de travail effectué à proximité de sources de flammes d'hydrogène. Par conséquent, à défaut d'équipements de détection, le premier signe de la présence possible d'une flamme se manifeste généralement par le sifflement émis par la fuite de gaz et éventuellement par les ombres projetées du fait des gradients thermiques de la flamme.

5.3.3 Explosions

5.3.3.1 Généralités

Lorsque l'hydrogène et un comburant ont l'opportunité de se mélanger avant l'inflammation, la flamme résultante se déplace rapidement à travers la zone de combustion. La flamme peut soutenir deux processus différents: la déflagration ou la détonation. Pour un être humain, les deux processus peuvent être perçus comme une explosion. L'onde de choc et les gaz chauds produits ont un impact sur le milieu ambiant et à l'extérieur de la zone de combustion. Ils peuvent être en outre désignés par «onde de souffle». L'onde de souffle ne comporte aucune combustion, mais elle provoque le déplacement physique des gaz (non réactifs) et des matériaux environnants insuffisamment arrimés (projection d'éclats). L'être humain ne peut pas faire la différence entre une onde de souffle et les processus de déflagration ou de détonation.

[ISO/TR 15916:2004](#)

5.3.3.2 Déflagration en milieu gazeux

Une déflagration est une flamme qui se propage à travers un milieu combustible dans les gaz imbrûlés à une vitesse subsonique. Les critères d'inflammabilité sont les mêmes que ceux applicables à un feu. La présence de surfaces de confinement, telles les parois d'une canalisation ou d'un récipient de stockage, peut provoquer la montée de la pression et favoriser l'augmentation de la vitesse de propagation de la flamme qui peut ainsi atteindre des centaines de mètres par seconde selon un processus dit «d'accélération de la flamme». Lorsque la flamme atteint une vitesse élevée et qu'elle rencontre une turbulence, le processus de déflagration peut se transformer en détonation. On parle alors de transition d'une déflagration vers une détonation (TDD).

5.3.3.3 Détonation en phase gazeuse

Le processus de détonation se distingue de celui d'une déflagration dans la mesure où l'onde de choc fait partie intégrante du processus de combustion. Les détonations se propagent à une vitesse supersonique dans les gaz imbrûlés, généralement entre 1 500 m/s et 2 000 m/s, et elles induisent également de hautes pressions. Plus qu'un processus énergétique, la détonation nécessite la présence d'un mélange hydrogène-comburants plus riche et des sources d'inflammation produisant sensiblement plus d'énergie que celle nécessaire à un incendie ou une déflagration. À titre d'exemple, à l'air libre, une puissante charge explosive est indispensable à l'initiation d'une détonation dans des mélanges d'hydrogène-air. Cependant, la présence de surfaces de confinement peut contribuer à élargir la gamme des mélanges aptes à la détonation et à réduire sensiblement l'énergie d'inflammation requise par la détonation. L'énergie dégagée par les détonations est réfléchiée par les surfaces de manière à ce que les effets des ondes de pression incidente et réfléchiée se cumulent et se combinent pour produire des pressions encore plus élevées de 2 à 3 fois supérieures à la pression produite par l'onde de choc incidente.