

Société de Calcul Mathématique SA

Outils d'aide à la décision

depuis 1995



Démonstrations de Sûreté pour

la Pile à Combustible :

Analyse critique des documents existants

Rapport rédigé

par la

Société de Calcul Mathématique SA

Juin 2022

Résumé Opérationnel

La filière nucléaire, en France, est très bien structurée : une Autorité de Sûreté Nucléaire qui a tout pouvoir pour stopper une installation si elle l'estime nécessaire ; elle s'appuie sur l'Institut de RadioProtection et de Sûreté Nucléaire, qui mène toutes les investigations que demande l'ASN. Les principaux industriels (EDF, Framatome, etc.) ont des centres de recherche, qui savent rédiger des démonstrations de sûreté. Le retour d'expérience est permanent et le moindre incident est rendu public et analysé. Le résultat est que le nombre d'incidents/accidents est infime, incomparablement plus faible que ce que l'on rencontre dans l'exploitation de l'hydrogène.

En application de cette doctrine très stricte, la France refuse de vendre des équipements nucléaires aux pays qui ne sont pas dotés d'une organisation de sûreté de ce type.

Pour la filière hydrogène, il n'y a rien : le retour d'expérience en ce qui concerne les accidents est géré par le BARPI [3] (ministère de l'Écologie) et s'arrête à juillet 2007 ! N'importe qui peut monter un projet "véhicule à hydrogène" en prétendant sauver la planète, et il recevra les subventions appropriées. La filière consiste en la juxtaposition d'une infinité de petits projets, tous entièrement dépourvus d'utilité économique ; aucun n'a fait l'objet d'une analyse de sûreté. Les accidents sont nombreux et, insiste le BARPI, dans l'ensemble très graves.

Dans ces conditions, les industriels doivent, par principe, refuser tout contact avec cette filière. Ils doivent, clairement et publiquement, annoncer qu'ils refusent de travailler avec une filière qui ne présente pas une organisation minimale pour la sûreté. Comme disait Victor Hugo (les Châtiments, 1853) : *L'honnête homme recule et s'accoude à l'écart.*

Un point est très important : les industriels doivent clairement faire savoir qu'ils se démarquent juridiquement de tels projets. En effet, pour l'opinion publique en France, l'industriel sera tenu pour responsable de tout accident ou dysfonctionnement.

Compte-tenu de ce défaut d'organisation de l'ensemble de la filière, aucune démonstration de sûreté n'est possible pour les véhicules à hydrogène. Culturellement parlant, aucun dialogue n'est possible entre un organisme qui a des exigences de fiabilité anciennes et précises et les responsables de projets, tels le "vélo à hydrogène" lancé par le Département de la Manche. La presse donne la plus large publicité à de tels projets, mais aucun des articles qui leur sont consacrés ne mentionne quelque préoccupation de sûreté que ce soit. Si on interroge les responsables, ils répondront qu'ils ont délégué cette tâche à des consultants ; ceux-ci ont fourni les rapports de complaisance que l'on attendait d'eux. L'organisation est verrouillée pour bénéficier au plus vite des 7 milliards d'Euros de subventions promis par la Commission européenne et le Gouvernement français, et les préoccupations de sûreté seront vues au mieux comme susceptibles d'engendrer des retards, au pire comme susceptibles de faire abandonner le projet.

Nous recommandons aux industriels concernés d'entrer en contact avec le BARPI et de réclamer que celui-ci demande à tout auteur d'un projet "hydrogène" de fournir un dossier de sûreté, d'enregistrer correctement les accidents qui se sont produits, etc. Le BARPI pourrait aussi réclamer la création d'une "Agence de Sûreté de l'Hydrogène", sur le modèle de l'ASN. Ceci

peut être fait dès à présent. Comme cette initiative proviendrait d'un organisme officiel (le BARPI dépend de la DGPR), elle aurait de bonnes chances d'aboutir à une prise de conscience par l'ensemble de la filière. Il n'y a aucun inconvénient de principe à ce qu'un industriel s'adresse au BARPI pour lui faire part de ses préoccupations relatives à l'hydrogène.

Après avoir expliqué ce que doit être une démonstration de sûreté en général, le présent rapport analyse la contribution d'un certain nombre d'articles scientifiques et met en évidence les erreurs de raisonnement qui sont commises. Certaines ne font que refléter l'ignorance des auteurs en matière d'évaluations probabilistes, d'autres relèvent d'une orientation biaisée dès le départ.

En conclusion, alors que les projets relatifs à la pile à hydrogène fleurissent un peu partout, il n'existe aucune démonstration de sûreté, aucun recueil du retour d'expérience, aucune analyse des accidents qui se sont déjà produits.

On ne peut parler de "scandale" : un scandale est relatif à un événement ponctuel, objet de la réprobation de toute une communauté. Ici, bien au contraire, nous sommes en présence d'un continuum de décisions absurdes, ruineuses, souvent dangereuses, mais ratifiées par toute la communauté puisqu'il s'agit de sauver la planète. Aucune des règles de base, qui s'imposent habituellement pour tout nouvel équipement, n'est respectée en l'occurrence. Nous voyons ici toute une population, à genoux, le dos courbé, psalmodiant à l'infini "il faut sauver la planète".

C'est l'aboutissement de 50 années d'obscurantisme, de déclin intellectuel et de négation de l'esprit scientifique. Il est permis de dire, suivant en cela Gabriel Garcia Marquez : aux lignées condamnées à 50 années d'obscurantisme, il ne sera pas sur terre donné de seconde chance.

Bernard Beauzamy
Juin 2022

Article complet :

http://www.scmsa.eu/archives/SCM_Pile_Combustible_2022_06_06.pdf

Avertissements préliminaires

Le sujet de l'utilisation de l'hydrogène, notamment au moyen d'une pile à combustible, fait maintenant l'objet de débats politiques d'où toute considération factuelle a disparu. On pourrait sans exagération dire que nous sommes maintenant en présence d'une guerre de religion, et une approche purement scientifique est difficile.

La question que nous nous posons permet heureusement une approche scientifique : il s'agit de lire les articles consacrés à la sécurité de la pile à combustible, et de voir s'ils représentent une démonstration de sûreté ou s'ils peuvent y contribuer significativement. Nous excluons donc par principe, toute approche de nature économique. La question n'est pas de savoir si le véhicule à hydrogène est rentable ou peut le devenir.

A. Malhonnêteté d'une large majorité d'articles scientifiques

L'intérêt porté à l'hydrogène tient actuellement à de mauvaises raisons : la combustion n'émet pas de CO₂ et la lutte contre le CO₂ est considérée comme une priorité par les politiques. Les scientifiques, toujours en quête de crédits, s'empressent d'écrire des articles soutenant le bien fondé des choix politiques ; pour surprenante qu'elle soit, cette réalité n'est pas nouvelle. Les idéologies les plus extrêmes du 20^{ème} siècle ont trouvé un appui quasi-unanime auprès des scientifiques de l'époque, avec de très rares exceptions (Max Planck – Werner Heisenberg [1]). Plus près de nous (2002), dans une note adressée au Secrétariat Général de la Défense Nationale (Premier ministre), nous avons dénoncé les futurs radieux que l'on prêtait à la constellation de satellites "Galileo" ("Galileo, chronique d'un scandale annoncé", [2]). Quelques années après, cette Note nous a valu les félicitations de Jacques Barrot, à l'époque vice-président de la Commission Européenne. Le projet était pourtant soutenu par la quasi-totalité des scientifiques de l'époque. Mentionnons avec ironie qu'aujourd'hui, 20 ans après, le projet Galileo n'est toujours pas opérationnel.

Si un article commence par quelque chose du genre :

"À l'heure où la transition écologique est l'une des grandes priorités à l'échelle internationale, de plus en plus d'acteurs s'attèlent pour imaginer des solutions durables respectueuses de l'environnement [...]. Il s'agit de positionner l'hydrogène comme une option pertinente pour verdifier le secteur."

on peut être sûr de la malhonnêteté de l'auteur. Or il devient de plus en plus facile d'écrire des articles scientifiques malhonnêtes. Jadis, il fallait recueillir des données et en déduire des conclusions ; aujourd'hui, les articles reposent très souvent sur des "modèles", qui ne sont que des constructions intellectuelles, totalement invérifiables ; c'est notamment le cas pour les estimations probabilistes, nécessaires dans une démonstration de sûreté, et auxquelles on peut faire dire ce que l'on voudra. Nous revenons plus bas sur un exemple précis. Nous mettons également en évidence des erreurs de raisonnement qui sont probablement involontaires.

Par conséquent, l'abondance d'articles concluant à la parfaite stabilité de la pile à combustible, sa résistance à toutes les formes d'agression, sa sécurité en général, doit alerter le décideur,

qui se dira qu'il y a "anguille sous roche". Nous recherchons ici s'il y a un seul article bien rédigé, et non s'il y a quantité d'articles mal rédigés. En science, la vérité ne résulte pas d'une majorité d'opinions.

B. Faisabilité technique

Il est complètement évident que la pile à combustible est techniquement possible et que, en prenant son temps, on peut écrire une démonstration de sûreté à ce propos. On pourrait dire de même à propos de toutes les sources d'énergie, utilisées ou non. La chimie saurait fabriquer des combustibles fossiles ; déjà les nazis produisaient de l'essence synthétique (Wikipedia). Dans le cas du nucléaire, la filière a trouvé une rentabilité rapide du fait que l'on a construit d'abord de grosses centrales ; on essaie aujourd'hui de construire de petits réacteurs (dits SMR). Peut-être la filière "hydrogène" aurait-elle intérêt à viser d'abord de grosses installations, plutôt que de se tourner immédiatement vers de petits moteurs.

Quoi qu'il en soit, une analyse critique ne portera pas sur la faisabilité technique d'ensemble, à horizon plus ou moins lointain, mais sur le respect, au moment présent, des normes de sécurité existantes. C'est très différent, et complètement factuel.

Chapitre 1

Qu'est-ce qu'une démonstration de sûreté ?

I. Généralités

Il s'agit d'une démonstration, au sens mathématique du mot. Elle est supposée démontrer qu'un système bien défini, dans des conditions d'exploitation bien définies, est sans danger pour l'homme et pour l'environnement.

Elle est donc caractéristique du système et ne peut a priori être transposée : une démonstration faite pour les poids lourds ne se transpose pas nécessairement aux trains. Il peut y avoir des éléments communs, mais ils doivent faire l'objet d'une justification. De même, la démonstration vaut pour des conditions d'exploitation bien définies (dans le cas d'un véhicule de transport : nombre de voyageurs, vitesse d'exploitation, type de route, etc.).

La démonstration consiste généralement à découper le système entier en sous-systèmes (eux-mêmes découpés en sous-sous-systèmes, etc.) et à s'interroger sur les défaillances possibles. Dans chaque cas, on s'interroge sur les causes, les conséquences, et si possible la probabilité.

Le calcul des probabilités est bien adapté aux situations où la documentation est abondante ; il ne l'est pas pour les situations nouvelles. Le dirigeable Hindenburg, en 1937, avait déjà fait 10 traversées sans encombre ; la probabilité que la 11^{ème} se passe normalement était de 91% (formule de Laplace, calcul SCM). L'avion Concorde est passé en une seule journée du statut d'avion le plus sûr du monde à celui d'avion le moins sûr du monde, selon les calculs probabilistes.

Un accident se produit lorsqu'une situation nouvelle est rencontrée, et le calcul des probabilités ne permet pas de le prévoir. Il faut en particulier se méfier des approches de type "Monte-Carlo", qui sont à la fois fausses et malhonnêtes : nous expliquons ceci plus loin.

Notre recommandation : pour une démonstration de sûreté relative à un système nouveau, veiller à procéder par scénarios bien définis et bien identifiés et se méfier par principe de toute approche à caractère probabiliste.

Ces scénarios doivent, par principe, inclure la réponse des opérateurs lorsque des dysfonctionnements sont constatés : on ferme telle vanne, on actionne tel disjoncteur. Il faut se préoccuper des situations où la réponse de l'opérateur n'est pas appropriée. Exemple provenant de la filière nucléaire :

Date 25/10/2013, Centrale de Gravelines

L'opérateur a du mal à manœuvrer un commutateur, et le remet en position initiale pour réessayer, mais ceci relance une série de tests et l'ouverture de certaines vannes, qui n'était pas désirée.

En 2014, à la demande de l'IRSN, nous avons participé à une analyse du "risque résiduel" en sûreté nucléaire : risque restant lorsque toutes les précautions ont été prises. Il est apparu que les situations (plus fréquentes qu'on ne le croyait) se répartissaient en quatre catégories :

1. Le dispositif est plus complexe qu'on ne le pensait initialement. La description qui en a été faite est trop simpliste ; on a oublié des variables cachées ;
2. La combinatoire des situations est plus complexe qu'on ne le croyait. Certes, on a envisagé de nombreuses configurations de pannes, de dysfonctionnements, etc., mais à l'usage, au bout de dizaines d'années de fonctionnement, on trouve des situations considérées au départ comme de probabilité négligeable : par exemple la conjonction de deux événements supposés à tort indépendants, et chacun ayant été évalué avec une faible probabilité (il convient ici de rappeler que les évaluations probabilistes sont très arbitraires) ;
3. La documentation n'est pas à jour. Ceci se produit fréquemment ;
4. Les travaux comportent des erreurs ; ceci aussi est fréquent.

Prenons un exemple pour faire comprendre la combinatoire d'événements rares. On peut imaginer que la foudre frappe une installation, c'est la cause d'un petit incendie localement. On peut imaginer en outre que les moyens de lutte soient inopérants (eau coupée, accès impossible, etc.). Un tel scénario, combinaison d'événements rares, n'est pas nécessairement prévu par la démonstration de sûreté.

La liste de telles situations est pratiquement infinie ; pour simplifier, nous suggérons l'approche suivante.

Pour chaque équipement (moyen de transport ou résidentiel) susceptible d'accueillir une pile à combustible, rendre publique une liste d'accidents survenus au cours des 30 dernières années (ou des situations qui auraient pu dégénérer en accident) et poser la question : si au lieu d'un équipement conventionnel nous avions eu une pile à hydrogène, que se serait-il passé ? Cela permettrait à tous les industriels concernés de disposer d'une base de données commune, relative aux scénarios à considérer. A défaut, chacun va générer les siens, et il sera extrêmement difficile de comparer et de décider lesquels sont pertinents ou non.

Une démonstration de sûreté, sur quelque sujet que ce soit, a vocation à être publique et n'importe qui doit pouvoir la critiquer. Il ne peut s'agir d'un consensus entre experts, mais bien, comme nous l'écrivons plus haut, d'une véritable démonstration, reposant sur des données vérifiées et les traitant au moyen d'arguments logiques.

II. Les dangers liés à la Pile à Combustible

A. Sources officielles

Nous citons ici le BARPI

Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels

Service des risques technologiques, Direction générale de la Prévention des risques

Le BARPI a rédigé un document extrêmement bien fait :

"ACCIDENTOLOGIE DE L'HYDROGENE", qui comporte l'analyse de 215 accidents répertoriés dans la base de données ARIA, impliquant de l'hydrogène et survenus avant le 1er juillet 2007. Le BARPI nous dit que la mise à jour est en cours. Il serait souhaitable que l'analyse des accidents se fasse sur un rythme annuel. Ce document indique :

"L'une des spécificités des accidents impliquant de l'hydrogène est la gravité de leurs conséquences"

Les articles provenant des US que nous analysons plus loin disent que les ingénieurs ne sont pas habitués aux propriétés de ce gaz, mais tous concluent (à tort) sur l'absence de danger spécifique. Pour eux, le risque d'avoir un accident dans un tunnel est le même, que le trafic soit restreint à des véhicules à propulsion conventionnelle ou qu'un véhicule à hydrogène soit présent. C'est évidemment contradictoire avec les observations du BARPI.

Le BARPI ajoute :

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène entraînent des risques particuliers ; il s'agit notamment de :

- sa faible masse molaire et sa petite taille qui le rendent prompt à fuir,
- son extrême inflammabilité et sa faible énergie d'inflammation,
- sa capacité à fragiliser les propriétés mécaniques des métaux et des alliages,
- ses réactions violentes avec certains composés, compte tenu de son caractère réducteur.

Sur l'inflammabilité, le BARPI indique :

Le risque principal lié à l'hydrogène est celui de l'incendie ou de l'explosion (84 % des accidents recensés), du fait de son domaine d'inflammabilité très large (de 4 à 75 % dans l'air, plus large encore dans des atmosphères enrichies en oxygène ou en chlore), ainsi que de sa très faible énergie d'activation. Les sources d'ignition des nuages inflammables formés par l'hydrogène sont multiples dans l'accidentologie : point chaud (ARIA 169, 15339, 27273 et 30365), foudre (ARIA 343), origine électrique (ARIA 542 et 25112), étincelle mécanique (ARIA 10095) ou encore électricité statique (ARIA 6716).

Pour une démonstration de sûreté, nous retenons en particulier le point 3), qui nous paraît inquiétant pour un exploitant. Cela semble indiquer que les installations devront faire l'objet d'une surveillance constante. Bien sûr, les ingénieurs sont habitués à l'oxydation des métaux ; on s'en protège par des peintures appropriées et des vérifications régulières. Mais ici nous sommes complètement en "terra incognita" : cette fragilisation est-elle rapide ? quels métaux ou alliages sont concernés ? Ce point n'est abordé dans aucun des articles que nous avons consultés, alors qu'une démonstration de sûreté vise à couvrir toute l'exploitation de l'équipement, et pas seulement l'instant T0 où il est déclaré "bon pour le service".

Recommandation : si des prestataires veulent faire rouler des trains à hydrogène sur le réseau français, qu'ils veuillent bien indiquer par avance quelles précautions seront prises pour tenir compte de la capacité de l'hydrogène à fragiliser les propriétés mécaniques des métaux et des alliages ; y aura-t-il des inspections régulières ? avec quelle périodicité et pendant combien de temps ? mettra-t-on en place des protections (physiques ou chimiques) particulières, si oui lesquelles ? Voir notre recommandation : demander au BARPI d'organiser la filière dans son ensemble.

B. Prise en compte du facteur "temps"

Un haut responsable de la sécurité à la RATP, spécialiste des équipements critiques (avec qui nous travaillons sur un autre sujet) nous fait observer que, à sa connaissance, dans les démonstrations de sûreté, le facteur "temps" n'est jamais convenablement pris en compte. Ce sont toujours des démonstrations statiques, où l'appareil est disséqué sur une table d'opérations. Or, dans la pratique, un véhicule peut en rattraper un autre, si le premier est trop lent et le second trop rapide, la distance entre les deux étant insuffisante. De même, la vitesse peut être source d'accidents, ou d'aggravation des dysfonctionnements. Ceci illustre bien le fait que la démonstration de sûreté doit avoir un caractère "dynamique", se plaçant dans les conditions réelles d'exploitation.

C. Erreurs de raisonnement

Dans les articles que nous avons consultés (voir plus bas), une erreur de raisonnement est systématiquement commise, en toute bonne foi (pensons-nous).

Disons qu'un paramètre, dans un scénario quelconque, peut prendre des valeurs entre 3 et 5 (peu importe de quoi il s'agit) ; on lui donne les valeurs 3, 3.1, 3.2, etc. et on fait les calculs dans chaque cas. A la fin du calcul, on obtient une estimation pour une variable d'intérêt : ce peut être la température atteinte, la portée de l'explosion, ou ce que l'on voudra. Les auteurs font ensuite la moyenne des valeurs prises par la variable d'intérêt, moyenne portant sur les 20 cas qui auront été analysés.

Cette démarche est fondamentalement incorrecte, parce que la plage des valeurs critiques, valeurs du paramètre qui peuvent conduire à un accident, peut se situer dans un "coin" de l'espace des configurations, par exemple les seules valeurs 3 et 3.1. On l'estompe en les mélangeant avec d'autres valeurs, pour lesquelles on ne risque rien.

Pour bien faire comprendre ceci, prenons un exemple concret : un bureau en bois de 2 m x 1m est parcouru dans le sens de la longueur par une grande fissure, d'un cm de large. La surface affectée est 2×10^{-2} m², soit un centième de la surface totale. On peut donc conclure que le bureau est intègre à 99% ; il n'empêche qu'il sera totalement impropre à certains usages.

La même erreur est commise lors de l'utilisation de la méthode de Monte-Carlo dans l'exploitation de codes de calcul ; nous en parlons plus loin.

Chapitre II

Etat des lieux

Il existe actuellement un bon nombre de véhicules à hydrogène et même de trains fonctionnant avec une pile à combustible. Le plus ancien et le plus avancé est Coradia iLint, d'Alstom, entré en service commercial en 2018 en Allemagne. Il transporte 300 passagers par jour.

En France, des rames Régiolis H2 ont été commandées à Alstom, le constructeur, par quatre régions : Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est, Auvergne Rhône-Alpes et Occitanie. La mise en circulation commerciale est prévue pour fin 2025 ; elle concerne 12 à 14 rames à hydrogène. Le coût global du projet est d'environ 230 millions d'Euros ; la SNCF y participe à hauteur de 8 millions d'Euros.

Pour pouvoir rouler sur les voies allemandes, Coradia iLint a fait l'objet de certifications, et des tests sont en cours aux Pays-Bas. "Le Coradia iLint d'Alstom, le premier train de passagers à hydrogène au monde, a reçu l'autorisation de l'Autorité ferroviaire allemande (EBA) pour entrer en service commercial en Allemagne, le 11 juillet 2018". Nous ne savons pas en quoi consistent ces certifications et quels tests le train a dû subir.

Mais "certification" n'est pas du tout équivalent à "démonstration de sûreté", comme nous allons maintenant l'expliquer. Une usine est certifiée ISO (9001 ou 14001) si le process de fabrication est suffisamment bien défini et bien contrôlé : "voici comment l'usine va fonctionner, et nous nous efforcerons de ne pas nous écarter de ces réglages". Selon beaucoup de hauts responsables, une certification est nécessaire, mais non suffisante, pour trois raisons :

- Elle procure un confort intellectuel douteux, en faisant croire à chacun qu'on est à l'abri des accidents ;
- Elle reporte la responsabilité sur l'organisme certificateur ;
- Elle décourage la recherche sur toute variation du process industriel.

L'usine AZF de Toulouse était parfaitement bien certifiée, ce qui ne l'a pas empêché de parfaitement bien exploser (2001).

On voit ici la différence essentielle avec une démonstration de sûreté : la certification concerne une normalisation du process, tandis que la démonstration de sûreté vise à l'analyse de tous les événements qui peuvent se produire.

L'exploitation commerciale de Coradia iLint est une bonne chose en soi : cela ne peut que contribuer à l'amélioration du retour d'expérience. Mais les industriels doivent veiller à ce que leur responsabilité ne soit pas engagée en cas d'accident (les plaignants et les tribunaux ont

tendance à incriminer les organismes qui sont solvables) et doit établir bien clairement que l'exploitation de Coralia iLint ne satisfait pas aux exigences de sécurité qui ont été définies.

D'autres essais de véhicules à hydrogène ont été lancés, apparemment sans succès. Le Département de la Manche a lancé en 2017 le projet BHYKE, visant à tester une vingtaine de vélos à hydrogène répartis sur les territoires de Saint-Lô et de Cherbourg ; l'expérimentation a été clôturée fin octobre 2019, sans qu'on sache pourquoi. L'apparition d'un nouveau projet "hydrogène" est reprise par toute la presse ; sa disparition se fait dans le silence général.

Chapitre III

Accidentologie

Nous faisons référence ici à la base de données "Aria", gérée par le BARPI : analyse de 215 accidents impliquant l'hydrogène et survenus avant le 1er juillet 2007 "Accidentologie de l'hydrogène". La base de données n'est pas à jour ; le BARPI nous a dit que la mise à jour était en cours. Comme nous l'avons déjà dit, nous pensons que cette mise à jour devrait se faire en rythme annuel.

La liste couvre toutes les activités où l'hydrogène intervient, et pas seulement les transports.

On est frappé par ceci : alors que l'hydrogène existe de toute éternité, et en abondance, l'humanité n'est jamais parvenue à le domestiquer. On pourra faire un parallèle avec la filière nucléaire, où les accidents sont extrêmement rares.

L'explication de cette différence est simple à comprendre : le nucléaire (ainsi que les pétroles, le gaz, etc.) s'est doté d'organismes de contrôle, qui agissent de manière très stricte. Il y a d'abord l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) et son bras armé, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), qui reçoivent copie de tous les incidents qui peuvent survenir. L'ASN a le pouvoir d'interrompre l'exploitation d'une installation, si elle juge la sécurité insuffisante. Il y a en outre des centres de recherche au sein des principaux exploitants (EDF, Framatome, etc.). Depuis sa création, la filière nucléaire a su maintenir un très haut niveau d'exigence.

Rien de tel avec l'hydrogène : il n'existe pas d'ASH (Autorité de Sûreté de l'Hydrogène), qui recevrait toute documentation sur les incidents et accidents, et aurait le pouvoir de stopper une expérimentation si elle la juge dangereuse. Il n'existe pas d'organisme analogue à l'IRSN, ni de centres de recherche.

Peut-on espérer que les choses vont s'améliorer, dans un futur proche ou lointain, et que la filière "hydrogène" saura se doter d'une "ossature" faisant référence scientifique ? Sûrement pas ! Tous les projets relatifs à l'hydrogène ont pour seul objectif de recueillir des subventions, pour la raison affichée qu'il faut "sauver la planète". Aucun ne fait l'objet d'une analyse économique (le projet sera-t-il rentable ?) ni d'une analyse de sécurité.

Prenons un exemple concret : DOSSIER DE PRESSE 15/09/2020

*H2 MANCHE, TERRITOIRE D'HYDROGÈNE VERT
LE DÉPARTEMENT IMPULSE UNE STRATÉGIE AUPRÈS DES ACTEURS MANCHOIS
(ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, ...) POUR LE DÉPLOIEMENT D'UN ÉCOSYSTÈME
HYDROGÈNE TERRITORIAL.
L'AMBITION ? CRÉER UNE SYNERGIE EN FAVEUR DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE*

Pionnier reconnu de la mobilité hydrogène en étant la première collectivité à avoir construit en 2015 une station de distribution pour une flotte qui compte désormais une vingtaine de véhicules, le Département de la Manche a poursuivi son investissement dans l'hydrogène en innovant régulièrement : en 2017 avec le projet BHYKE, visant à tester une vingtaine de vélos hydrogène répartis sur les territoires de Saint-Lô et de Cherbourg (expérimentation clôturée fin octobre 2019), aujourd'hui avec la construction de cinq trackers qui permettront de capter l'énergie solaire pour produire, par électrolyse, un hydrogène renouvelable (30 kg/j).

Dans le cadre de son implication en faveur de la transition écologique, et après avoir innové avec les véhicules légers puis les vélos, le Département de la Manche a poursuivi son investissement de la mobilité hydrogène en contribuant à l'émergence d'un projet de mobilité poids-lourds. Initié mi-2019, le développement de ce projet nommé « ETHyR CoManche » se poursuit en 2020 dans la perspective d'une réponse au prochain appel à projet « Mobilité H2 » de l'ADEME.

Après l'Allemagne puis la Commission Européenne, le gouvernement français a annoncé le 3 septembre dernier lors de la présentation de son plan de relance, un ambitieux plan en faveur de l'hydrogène à hauteur de 7 milliards d'euros. Ce coup d'accélérateur au développement de la filière hydrogène, qui prévoit l'instauration d'aides financières à la production d'hydrogène vert, permettra à la mobilité hydrogène de devenir compétitive.

Le Département de la Manche poursuit son action de consolidation de l'écosystème hydrogène territorial en lançant une initiative hydrogène manchoise intitulée « H2 MANCHE : Territoire d'hydrogène vert ».

On se demande bien qui a eu l'idée de vélos à hydrogène : cela ne répond à aucun besoin des consommateurs. Si on fait une recherche sur Internet, on trouve quantité d'articles qui leur sont consacrés, tous plus louangeurs les uns que les autres : "mobilité verte en marche", etc. Aucun, absolument aucun, de ces articles ne mentionne les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène, et il serait tout à fait inutile d'interroger à ce sujet les responsables du projet au sein du Département de la Manche. Bien entendu, les responsables politiques se sont "couverts" : ils ont demandé à des consultants de rédiger un "dossier de sécurité", que personne n'a jamais vu et qui n'est pas public. La naissance, la vie et la mort des projets se font dans l'obscurité : personne ne sait d'où provient le besoin, personne ne sait quelles vicissitudes le projet a rencontrées, ni pourquoi il a finalement été abandonné. On peut toujours consulter sur societe.com les bilans financiers des entreprises associées au projet.

Les non-initiés s'étonneront du fait que des scientifiques, en principe honnêtes et indépendants du pouvoir politique, puissent apporter leur caution à des projets manifestement dépourvus de toute chance d'aboutir ; témoin le rapport du Cabinet PriceWaterhouseCoopers concernant la rentabilité de Galileo (2002) ; avec l'appui du CNES, il concluait à une rentabilité sans équivoque et passait sous silence les multiples questions techniques non résolues.

Plus frappant encore est le soutien quasi-unanime de la communauté scientifique allemande aux thèses nazies (avec l'exception notable de Heisenberg et Planck), et ce dans la plus parfaite impunité. Lors des procès de Nuremberg, aucun scientifique allemand n'a été condamné.

La Commission Européenne et le Gouvernement français déversent sur la filière "hydrogène" des subventions qui se comptent en milliards d'Euros. Il est tout à fait vain d'espérer que les responsables imposeront un jour à cette filière les contrôles de sécurité auxquels sont astreints les autres filières.

Analyse critique d'articles scientifiques

On trouvera ci-après nos analyses critiques concernant un certain nombre d'articles qui présentent un intérêt scientifique.

A1

DYNAMIC CRUSH TEST ON HYDROGEN PRESSURIZED CYLINDER

H. Mitsuishi; K. Oshino; S. Watanabe

Conference paper, 2005

On étudie le comportement d'un réservoir rempli d'hydrogène en cas de choc ; le choc est obtenu en laissant tomber une masse sur le réservoir. La conclusion est que la rupture du réservoir ne se produit pas comme attendu :

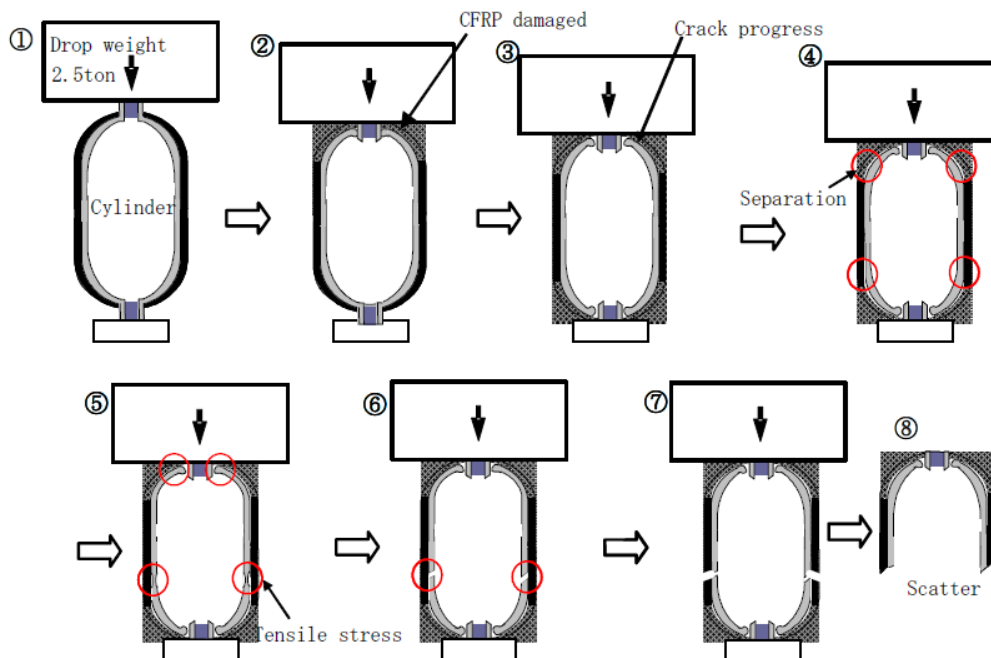


Figure 15. The cylinder ruptures process.

Ceci n'est évidemment pas une démonstration de sûreté, mais a le mérite de conduire une véritable expérimentation. Le comportement du réservoir d'hydrogène en cas de choc fera nécessairement partie de la démonstration de sûreté.

http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/safety_biblio/ichs2005/papers/310001.pdf

Le lien ci-dessus aboutit à "document not found" sur le site web de l'US Department of Energy.

A2

Failure Modes and Effects Analysis for Hydrogen FuelCell Vehicles – Subtask 1

STEPHENS, D., ROSE, S., Flamberg, S. A., Ricci, S. M., & GEORGE, P. (No. DOT-HS-811-075).

U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2009

Cet article étudie les modes de défaillance possibles dans les réservoirs d'hydrogène comprimé. Il conclut :

Dans l'ensemble, les modes de défaillance uniques qui semblent présenter le plus grand risque dans les véhicules à hydrogène sont les rejets importants d'hydrogène et la rupture du réservoir de carburant. Les résultats de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets, et de leur Criticité) montrent que les composants haute pression des systèmes de carburant à hydrogène comprimé manquent de redondance, de sorte qu'une défaillance en un seul point du conteneur, du PRD (pressure relief device : réducteur de pression) ou de la première vanne peut entraîner une libération ou une ventilation à grande échelle d'hydrogène et, pour les conteneurs, une libération d'énergie mécanique. Les petits rejets d'hydrogène et la rupture d'autres composants peuvent également être dangereux, mais n'ont pas la force destructrice potentielle des grands rejets et de la rupture du réservoir de carburant.

L'article distingue entre :

- Risques d'incendie dans le cas d'une fuite d'hydrogène (risques de combustion),
- Energie potentielle du stockage haute pression (risques haute pression),
- Énergie électrique dans le système de pile à combustible (risques électriques),
- Réponse du véhicule en cas de collision (risques de collision),
- Réponse du véhicule en cas d'incendie extérieur (risque d'incendie).

Dans chaque cas, les probabilités sont rangées en trois classes : Low, Medium, High, ainsi que les conséquences. Le jugement d'expert est utilisé : nous n'avons pas trouvé trace de l'utilisation de modèles, ni de données provenant d'un retour d'expérience.

En France, nous ne procéderions pas de cette manière : nous introduirions un certain nombre de scénarios, bien identifiés, et pour chacun on rechercherait la probabilité et le déroulement.

L'article ne constitue pas une démonstration de sûreté : il est beaucoup trop grossier et n'entre dans le détail d'aucun scénario d'exploitation. Cela dit, il est bien documenté, et rédigé de manière honnête ; il peut servir de base à des analyses plus détaillées.

A3

Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research

Stephanie Flamberg, Susan Rose, Denny Stephens – Battelle Memorial Institute

U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration,

février 2010

Cet article est intéressant, car il se présente comme un "guide de la recherche" à propos de la sécurité des véhicules à hydrogène. Les principaux thèmes abordés sont :

- Recherche sur les fuites, la dispersion et l'ignition de l'hydrogène (modélisation et tests)
- Amélioration des méthodologies de test existantes pour les véhicules à hydrogène et les incendies de conteneurs (modélisation et/ou tests pour améliorer les spécifications)
- Rupture du réservoir d'hydrogène comprimé en cas de défaillance du dispositif de décompression (PRD) (tests pour déterminer les conséquences)
- Recherche générale sur la sécurité des véhicules à hydrogène (sécurité des piles à combustible, analyse de la sécurité et des risques, programmes de démonstration de véhicules et codes et normes)
- Conception et test de bouteilles d'hydrogène
- Ravitaillement rapide de conteneurs d'hydrogène comprimé de 70 MPa (modélisation et test des charges thermiques)
- Composants et véhicules du système de stockage d'hydrogène liquéfié (LH2) (conception, test et démonstration)
- Données d'incident pour les conteneurs de gaz naturel comprimé (GNC)

A chaque fois, l'article indique les laboratoires qui travaillent sur ces questions et les principaux résultats obtenus.

Nous retenons en particulier cet extrait, qui met en doute la validité des modèles et réclame des expérimentations :

Des chercheurs de l'Institut japonais de recherche automobile (JARI) ont découvert que les tests d'inflammabilité peuvent produire des résultats très variables selon les paramètres d'essai (taille de la flamme, type de carburant, types de boucliers PRD, températures ambiantes, etc.) utilisés pendant l'essai - dont aucun n'est correctement décrit dans la procédure.

Les chercheurs ont conclu que les tests d'incendie sur les cylindres ne représenteront pas toujours un véritable incendie de véhicule, même s'ils sont menés avec un niveau élevé de cohérence. A ce titre, l'évaluation de la sécurité des véhicules à hydrogène par un test d'exposition à la flamme sur le véhicule réel est recommandée pour améliorer l'authenticité des tests.

Cet article ne représente donc pas une démonstration de sûreté, même partielle, mais il est intéressant par l'approche méthodologique retenue. On peut dire que la lecture de l'article sera nécessaire à quiconque veut réaliser une véritable démonstration de sûreté.

Risk Assessment of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles in Tunnels
 Brian D. Ehrhart • Dusty M. Brooks • Alice B. Muna • Chris B. LaFleur
 Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185 USA
 Fire Technology volume 56, pages 891–912 (2020)

Cet article représente à soi seul une caricature de ce qu'il ne faudrait jamais faire. Comme il ne fait que 16 pages, il se lit facilement.

Bien entendu, l'article conclut que l'hydrogène n'apporte aucun danger supplémentaire, par rapport au trafic usuel dans les tunnels :

" La conséquence la plus probable d'un accident est l'absence de danger supplémentaire due à la présence d'hydrogène (probabilité de 98,1 à 99,9 %), en sus des dangers ordinaires relatifs aux accidents dans les tunnels."

L'article introduit un arbre de défaillance (Event Sequence Diagram), mais il est d'une incroyable naïveté :

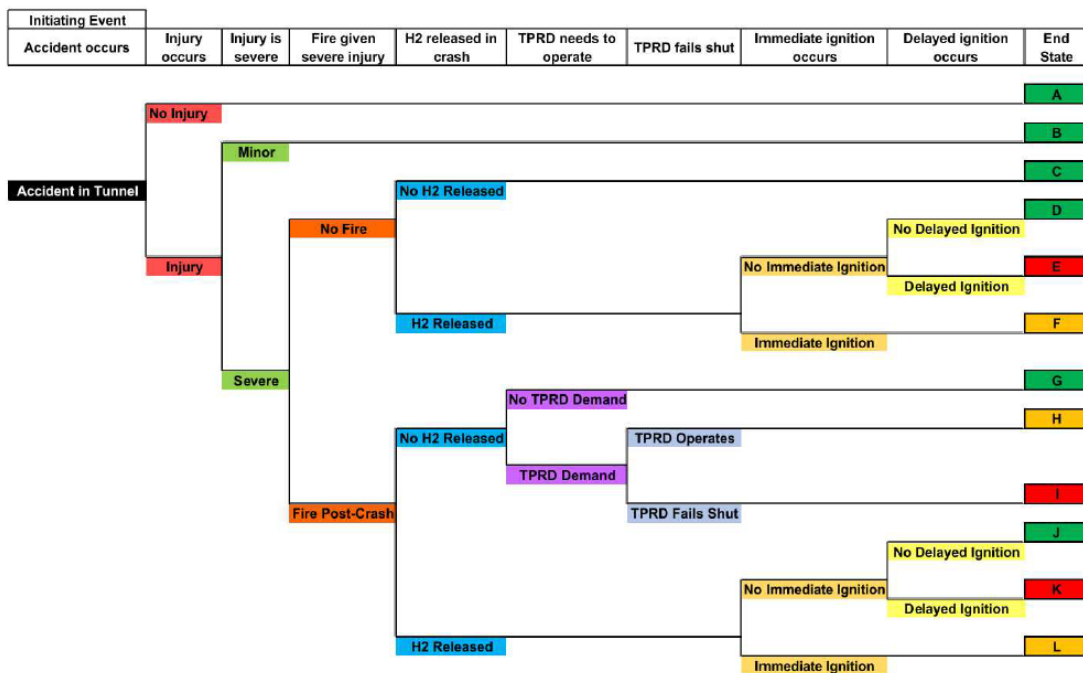


Fig. 1 Event sequence diagram for hydrogen FCEV crash

Les premières questions à se poser, en cas d'accident dans un tunnel sont : le tunnel est-il encore accessible ? Y a-t-il encore une ventilation ? L'alimentation électrique existe-t-elle encore, etc.

Ensuite, l'article procède à des calculs probabilistes. On voudrait assigner une probabilité à chaque branche du diagramme ci-dessus. Ce n'est évidemment pas possible, compte-tenu du faible retour d'expérience. Aussi, les auteurs font-ils l'hypothèse d'une loi de probabilité particulière, à savoir une loi Gamma :

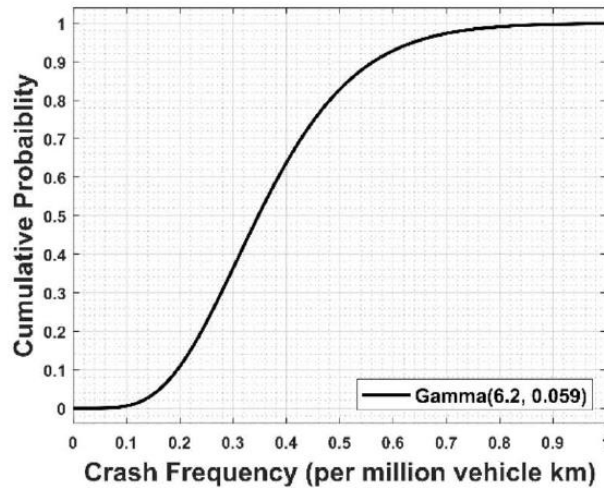


Fig. 2 Uncertainty distribution on the car crash frequency in tunnels

ce que rien ne vient justifier.

L'utilisation des méthodes de Monte-Carlo

La méthode de Monte-Carlo consiste à jeter des valeurs au hasard (ici 10^5 fois), prises dans l'espace des configurations, et à retenir la moyenne des valeurs prises comme estimation du résultat.

Cette méthode, comme nous l'avons expliqué en grand détail sur notre site web

http://www.scmsa.eu/SCM_bonnes_pratiques.htm

est entièrement fautive. Rappelons-en les raisons ; elles sont évidentes pour toute personne de bon sens.

Imaginons qu'un process dépende de 50 paramètres (en général il y en a bien plus) ; ce seront ici les dimensions du tunnel, les caractéristiques du véhicule, sa vitesse, etc. Imaginons que chaque paramètre ne puisse prendre que 10 valeurs (en général, les paramètres peuvent prendre une infinité de valeurs) : l'espace de toutes les configurations possibles représente 10^{50} points. Si vous faites 10^5 essais, vous aurez exploré une proportion $\frac{10^5}{10^{50}}$ de l'espace des configurations : c'est infime !!

En langage imagé, on peut dire ceci : les accidents vont se produire dans des zones particulières de l'espace des configurations, ce qu'on pourrait appeler les "coins". Imaginons que l'accident puisse survenir si tous les paramètres sont petits, disons dans la première moitié des valeurs possibles. La probabilité d'un tel "coin" est de $\frac{1}{2^{50}}$ et vous ne le détecterez jamais en jetant des runs au hasard, si nombreux soient-ils. Pour le trouver, il faut le chercher de manière déterministe, en utilisant la connaissance des experts.

Nous-mêmes avons eu à critiquer l'usage des méthodes de Monte-Carlo, dans les démonstrations de sûreté, lors de contrats avec EDF, Framatome, etc. Mais c'est une habitude difficile à

faire perdre aux ingénieurs : ils ont des codes de calcul, qui tournent vite et, pour eux, la réponse à la complexité de l'espace des configurations est toujours "il faut faire beaucoup de runs". Cela met en valeur la rapidité des codes de calcul et procure un agréable sentiment de confort intellectuel.

On a un problème complexe à résoudre : déterminer le degré de sécurité d'un véhicule, reposant sur des principes nouveaux, et pour lequel le retour d'expérience est infime. Il faut une bonne dose d'incompétence et de malhonnêteté pour croire qu'on y parviendra en jetant des runs au hasard.

Recommandation : si les mots "Monte-Carlo" apparaissent dans un article relatif à la sûreté, on peut être certain que les auteurs sont à la fois incompetents et malhonnêtes. Un tel article doit être rejeté immédiatement, sans autre forme d'analyse.

A5

Safety Issues for Hydrogen-Powered Vehicles
J. T. Ringland, Sandia National Laboratories
Albuquerque, New Mexico 87185
1994

Résumé de l'article :

"Cet article examine comment les propriétés fondamentales de l'hydrogène et le retour d'expérience, en ce qui concerne la manipulation de ce gaz, peuvent contribuer à comprendre comment le système doit être conçu pour que la conception du système maximise la sécurité de ces véhicules. Le retour d'expérience provient de plusieurs sources : discussion avec un fournisseur vendant de l'hydrogène, analyse des risques tirée de l'expérience industrielle et de la NASA, et rapports publiés par des groupes mettant en service des véhicules de démonstration à hydrogène.

"Il y a des preuves abondantes montrant que l'hydrogène peut être manipulé en toute sécurité, si ses propriétés spécifiques (parfois meilleures, parfois pires, et parfois juste différentes des autres carburants) sont respectées.

"Deux problèmes critiques sont la prévention et la détection des fuites d'hydrogène dans des conditions de fonctionnement normales et l'évacuation sûre de l'hydrogène pour éviter une accumulation excessive de pression dans le stockage. C'est en grande partie une question de bonne ingénierie et de sélection des matériaux appropriés. Les mélanges inflammables entre un combustible et l'air, dans des zones confinées, doivent être évités. Le remplissage des réservoirs et les opérations de maintenance sont délicats. Le ravitaillement et l'entretien augmentent également les risques.

"Ici, le respect de procédures d'exploitation sûres qui maintiennent l'hydrogène et l'air séparés sont critiques. "

L'article analyse un certain nombre d'accidents, comme le fait le BARPI, mais de manière beaucoup moins approfondie. Il conclut que les accidents sont rares et la responsabilité de l'hydrogène très limitée. Typiquement, un véhicule est muni de bonbonnes d'hydrogène ; le véhicule a un accident, mais les bonbonnes ne fuient pas et n'explosent pas.

L'article ne représente pas une démonstration de sûreté, pas même une introduction méthodologique à de telles démonstrations. Chacun sera certainement satisfait d'apprendre que les bonbonnes d'hydrogène n'explosent pas toujours en cas de choc, mais les arguments quantitatifs font défaut, ainsi que l'analyse des situations à risque. L'article ne mentionne pas non plus le second danger mentionné par le BARPI : l'hydrogène corrode les métaux. Globalement, l'article présente une conclusion lénifiante, en opposition avec l'analyse du BARPI, qui est complètement factuelle.

Résumé de l'article : Ce rapport fournit un résumé de la littérature disponible caractérisant les dangers présentés par les véhicules électriques à pile à combustible à hydrogène, y compris les véhicules légers, moyens et lourds, ainsi que les autobus. Les recherches caractérisant à la fois les scénarios les plus pessimistes et les scénarios crédibles, ainsi que l'analyse fondée sur les risques, sont résumées. Des lacunes dans la recherche sont identifiées pour orienter les futurs efforts de recherche afin de fournir une analyse complète des dangers et des recommandations pour une utilisation sûre des véhicules électriques à pile à combustible à hydrogène dans les tunnels.

L'article mentionne que les tunnels de chemin de fer sont exclus de l'investigation : "Railway tunnels are not considered in this definition because rail tunnels represent much larger volumes of hydrogen transported as cargo or to fuel the locomotive".

Cet article a ceci d'original et d'intéressant qu'il emploie des méthodes de modélisation "CFD" (Computational Fluid Dynamics) pour prédire l'effet d'une explosion. Il est très difficile de se prononcer sur la qualité de ces modèles, qui font d'innombrables hypothèses pour que les codes puissent tourner. Néanmoins, les prévisions des modèles, au moins à titre d'ordre de grandeur, pourront être comparées aux observations lorsque celles-ci seront disponibles. En France, les pompiers utilisent des codes de calcul pour prévoir la propagation d'un incendie et, pour autant que nous le sachions, ils en sont satisfaits. La difficulté est d'abord de mettre en évidence les paramètres qui vont influencer sur le résultat ; dans le cas d'un tunnel, ce seront en particulier les dimensions du tunnel, la présence de ventilation, la quantité d'hydrogène concernée, etc. On se retrouve très vite avec une multiplicité de paramètres, que l'on ne sait pas gérer, faute de données, mais nous admettons volontiers qu'un code de calcul peut donner des résultats intéressants, en particulier sous la forme d'ordres de grandeur. A ce jour, l'utilisation de codes de calcul "maison", non validés par l'expérimentation, n'est pas admise dans les démonstrations de sûreté, mais ce n'est pas ce que l'article prétend faire.

La conclusion générale de l'article est que la présence de véhicules à hydrogène dans un tunnel n'apporte pas de dangers supplémentaires, par rapport au trafic usuel qui emprunte le tunnel. Cette conclusion est normale, compte-tenu du mode d'investigation retenu : valeurs moyennes pour chaque scénario ; elle ne provient pas de la malhonnêteté des auteurs. Mais il est permis de la contester : les accidents se produisent "dans les coins" de l'espace des configurations (situations de très faible probabilité), comme nous l'avons expliqué plus haut, et il est permis de penser que la présence d'hydrogène accroîtra les risques et les conséquences d'un accident.

Références

[1] Extrait du livre "la Partie et le Tout", Werner Heisenberg (éditions Champs) 1933 : conversation avec Max Planck ; disponible sur le site web de la SCM : http://www.scmsa.eu/archives/Heisenberg-Planck_1933.pdf

[2] Galileo : chronique d'un scandale annoncé ; Note adressée au Secrétariat Général de la Défense Nationale (Premier ministre) par la SCM SA, 2002. Disponible sur le site web de la SCM : http://www.scmsa.eu/archives/SCM_SGDN_Galileo_2002.pdf

[3] BARPI ; Analyse de l'accidentologie de l'hydrogène, 27/10/2008 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/1373986645SYHydrogene2008.pdf

Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels
2 rue Antoine Charial
69426 Lyon Cedex 03
Téléphone : 04 37 91 44 89
Service des risques technologiques
Direction générale de la Prévention des risques
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement
Durable et de l'Aménagement du Territoire
Grande arche de la Défense - Paroi Nord
92055 La Défense cedex
Téléphone : 01 40 81 92 32