HAL
open science

Mécanismes de dispersion de l'hydrogène liquide

Christophe Proust, Didier Gaston

To cite this version:

Christophe Proust, Didier Gaston. Mécanismes de dispersion de l'hydrogène liquide. Conférence "Millénaire de l'Hydrogène", May 2000, Québec, Canada. ineris-00972197

HAL Id: ineris-00972197

https://ineris.hal.science/ineris-00972197v1

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INERIS
Parc Technologie ALATA
B. P. n° 2
60550 VERNEUIL EN HALATTE

e-mail:christophe.proust@ineris.fr
e-mail:didier.gaston@ineris.fr

Mécanismes de dispersion de l'hydrogène liquide

C. PROUST - D. GASTON

1 INTRODUCTION

L'INERIS a entrepris un programme de Recherche pour étudier les mécanismes de dispersion de l'hydrogène cryogénique et les mécanismes de propagation de flamme dans des nuages d'hydrogène (D. Gaston and al. 1994).

L'objectif visé est de contribuer à la maîtrise de la mise en œuvre industrielle de stockage important d'hydrogène liquide à pression proche de la pression atmosphérique.

Dans le cadre de ce programme, nous nous sommes intéressés uniquement aux risques présentés par des fuites de débit important, typiquement de 1kg/s à quelques dizaines de kg/s. De telles fuites correspondent à des ruptures "franches" de canalisation situées en pied de réservoirs. De tels scénarios d'accidents, de probabilité faible, sont retenus en France dans le cadre des autorisations d'exploiter pour déterminer notamment les contraintes liées à la maîtrise de l'urbanisme autour des installations.

Lors d'un accident, les quatre phases suivantes peuvent se succéder :

- création d'une fuite et détermination des débits de fuite,
- formation d'une nappe liquide et vaporisation de l'hydrogène,
- formation d'un nuage H_2-air,
- inflammation de l'atmosphère explosive, propagation de la flamme dans l'atmosphère explosive et évaluation des ondes de pression créées.

Dans le cadre de ces travaux nous nous sommes limités à la situation de la dispersion à l'air libre c'est-à-dire que sont ignorées les contraintes liées aux effets de confinement (fuite dans un local, par exemple).

Dans la suite de cet exposé, nous nous intéresserons uniquement à l'évaporation de l'hydrogène au dessus de la nappe liquide et à la dispersion des vapeurs d'hydrogène dans l'atmosphère. La connaissance de ces différentes phases est une étape intermédiaire indispensable pour aborder ensuite les effets d'une explosion.

2 DEMARCHE ADOPTEE

A travers une étude bibliographique (C. Proust al., 1994) nous avons essayé d'identifier les paramètres principaux dont dépendent l'évaporation de l'hydrogène cryogénique et les conditions de dispersion dans l'air.

Ensuite, nous avons mis en place un protocole d'essai pour caractériser les paramètres importants identifiés précédemment. La mise au point de ces essais à nécessité le développement de moyens de mesures spécifiques pouvant être mis en œuvre de façon aisée en grand nombre et dans des conditions expérimentales contraignantes.

Pour des raisons de sécurité et de coût de mise en œuvre, les essais de dispersion que nous avons réalisés ont été conduits avec de l'hélium liquide. Une dizaine d'essais a été effectuée.

3 ANALYSE DES DONNEES PUBLIEES

3.1 Vaporisation de l'hydrogène cryogénique

3.1.1 Données extraites de la littérature

Un litre d'hydrogène liquide permet d'obtenir 830 litres de vapeurs d'hydrogène dans les conditions normales de température et de pression. La chaleur d'évaporation à la pression atmosphérique est de 110 cal/g.

Quelques données expérimentales sur les vitesses d'évaporation sont disponibles. Makeev (Makeev et al., 1981) a réalisé des expériences d'épandage d'hydrogène liquide dans une cuve en béton de surface au sol de 4 m x 4 m en faisant varier la quantité d'hydrogène déversée et la nature du sol. D'autres résultats d'essais sont fournis par Zabetakis (Zabetakis et al., 1961), Cassutt (Cassutt et al., 1960) et Witcofski (Witosfski et al., 1984). Les résultats de ces différents essais peuvent être résumés ainsi :

- le taux d'évaporation varie de manière importante en fonction de la rugosité du sol. Il passe de 0,035 $kg/m^2.s$ pour un sol "lisse" à 0,27 $kg/m^2.s$ pour un sol très rugueux ;

- le taux d'évaporation varie fortement en fonction du temps. Immédiatement après l'épandage, l'émission de vapeur est caractérisée par l'éruption aléatoire de poches de gaz. Après quelques dizaines de secondes, le phénomène d'évaporation se stabilise et à tendance à diminuer légèrement d'intensité par la suite.

3.1.2 Interprétation

a) Comparaison flux de chaleur apporté par le sol et échanges avec l'air.

Le flux de chaleur transmis par le sol peut s'exprimer sous la forme

$$q_s = \frac{\lambda_s \varepsilon}{2\sqrt{a_{s.t}}}(\sigma_o - \sigma_s) \quad [1]$$

avec :

- q_s = flux de chaleur transmis par le sol au fluide
- q_s = flux de chaleur transmis par le sol au fluide
- λ_s = conductivité thermique du sol ($\lambda_s \approx 1$ J/ms)
- = rugosité du sol (1 pour "lisse", > 1 pour "rugueux")
- as = diffusivité thermique du sol ($a_s \approx 10^{-6}$ m^2/s)
- t = temps (t = O à l'instant de l'épandage)
- σ_o = température du sol
- σ_s = température de surface au contact de l'hydrogène liquide

Cette expression n'est pas en principe exacte à t = O mais donne une tendance correcte. En appliquant cette relation aux travaux de Makeev on obtient des ordres de grandeur des flux de chaleur transmis par le sol variant entre 16 et 120 Kw/m^2 en régime pseudo-stationnaire.

Par la suite, du fait du refroidissement du sol, au bout de quelques minutes, le flux thermique décroît et devient proche de 10 Kw/m^2.

L'intensité des échanges de chaleur entre l'air et la nappe d'hydrogène liquide peut être estimée à partir d'expressions standards (aide mémoire du thermicien A^3 E^2 th, 1987) en considérant qu'il existe au contact de la nappe d'hydrogène liquide une couche où les composants de l'air se condensent et une zone au-dessus où l'air se refroidit par convection naturelle jusqu'à la température de condensation. On obtient ainsi des valeurs d'échanges de chaleur de 10 Kw/m^2.

Pour des durées de fuites de l'ordre de la minute, l'intensité des flux thermiques avec le sol est donc prépondérante par rapport aux échanges avec l'air. En partant de cette hypothèse, on peut estimer les dimensions de la nappe de liquide formée en espace libre. On obtient ainsi

$$D = 1{,}13.\ (q_i.Lv/q_s)^{1/2} \quad [2]$$

avec :

- D = diamètre de la nappe (m)
- Lv = chaleur de vaporisation (J/Kg)
- q_i = débit de LH_2 (Kg/s)
- q_s = flux de chaleur transmis par le sol (KW/m^2).

On ne dispose actuellement que de deux valeurs expérimentales (Verfondern, 1997 et Witcosfki, 1984) qui sont données dans le tableau 1.

Nature du sol	Débit de LH_2 (kg/s)	Diamètre de la nappe (m)
plaque d'acier	0,4	0,5
sable	10	6

Tableau 1 : dimension de la nappe de LH_2 selon la nature du sol

b) Prise en compte des différents types d'ébullition

La validité de la relation [1] suppose que la température de la surface en contact avec la nappe d'hydrogène liquide est constante et égale à la température d'ébullition de l'hydrogène. En réalité, des études sur les phénomènes d'ébullition (Delhaye, 1981) sur une paroi chaude ont montré que lorsque le flux thermique dégagé par la paroi est très intense, un film de vapeur continu sépare la paroi du liquide et la température de la paroi peut être différente de la température d'ébullition. C'est vraisemblablement le phénomène qui prédomine lors des premiers instants de la vaporisation de l'hydrogène cryogénique.

A mesure que le flux thermique reçu par la nappe d'hydrogène diminue, le film de vapeur se détruit et le liquide reprend contact avec la paroi (ébullition nucléée). Ce moment correspond au point de Leidenfrost et il se produit lorsque le flux thermique est tel que :

$$q_{sl} = 0{,}09 \ \rho_v \ \Delta H_v \left[\frac{\tau(\rho e - \rho v) g}{(\rho e + \rho v)^2} \right]^{1/4} \quad [3]$$

avec

- q_{sl} = flux thermique au point de Leidenfrost
- ΔH_v = chaleur latente de vaporisation
- τ = tension de surface du liquide
- ρe = densité du liquide
- ρv = densité des vapeurs
- g = accélération de la pesanteur

Pour l'hydrogène liquide, q_{sl} est de l'ordre de 15 Kw/m^2. En comparant cette valeur avec les valeurs de flux données par la relation [1] on constate que pour des durées de quelques secondes (< à la minute) le régime d'ébullition est de type "film". Par la suite, il évolue vers une ébullition de type "nucléée".

Les deux régimes d'ébullition peuvent expliquer la phase de vaporisation "agitée" évoquée par Zabetakis (Zabetakis et al., 1967) et peuvent être à l'origine de la formation d'un nuage initial nettement séparé du nuage principal comme constaté par ce même acteur.

3.2 Dispersion de l'hydrogène

3.2.1 Données extraites de la littérature

A la température d'ébullition (-253°C), l'hydrogène a une densité voisine de l'air. A température ambiante la densité est de 0,069 par rapport à l'air. La densité de mélange hydrogène/air varie considérablement au cours de la dilution et globalement reste plus petite que celle de l'air.

A notre connaissance, le nombre d'expériences consacrées à la formation du nuage est réduit. Makeev (Makeev et al., 1981) a réalisé des essais de laboratoire avec des petits débits (moins de 0,5 kg/s). Witcosfski (Witcosfski et al., 1984) a réalisé des essais en grand. Des essais ont été réalisés en Allemagne dans les années 90 (Schmidtchen et al., 1992). Ces essais sont malheureusement peu exploitables en raison de problèmes d'instrumentation.

Une analyse qualitative des essais montre que :

- lorsque les débits sont importants (plusieurs kg/s), un mouvement de turbulence interne puissant animerait le cœur du nuage,
- la dispersion s'accompagne d'un mouvement global ascendant du nuage de l'ordre de 1 m/s.

Par ailleurs, quelques informations sur la répartition possible de l'hydrogène à l'intérieur du nuage sont disponibles (Figure 1).

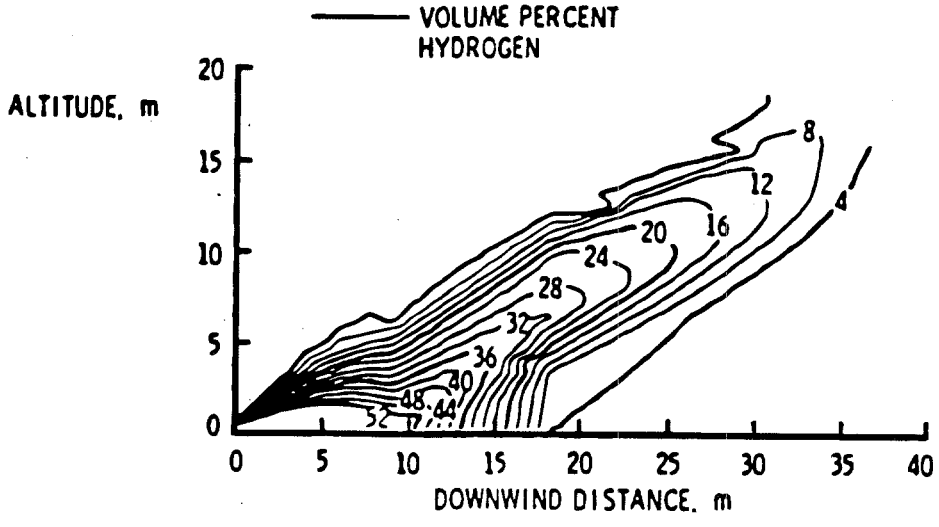

Figure 1 :
Coupe d'un nuage H2-air formé lors de l'épandage sur du sable d'un débit de 10 Kg/s de LH2 (vent 2 3 m/s, t = 21 s) (d'après Witcosfi et al., 1984)

3.2.2 Interprétation

Nous ne nous attardons pas sur les propriétés de la turbulence atmosphérique qui ont fait l'objet de nombreuses publications

Influence des forces d'Archimède

Une analyse fine des conditions du mélange H_2/air montre que la densité du mélange air/hydrogène est en moyenne d'environ 0,9 dans une large gamme de taux de dilution plus petit que 20%. De ce fait, le cœur du nuage est assuré d'un mouvement ascendant dont l'ordre de grandeur de la vitesse peut être obtenu en considérant le nuage comme une "bulle" de diamètre caractéristique ∅ (Davidson, 1985) :

$$\mathrm{Vac} = 0{,}7 \sqrt{g\phi \frac{(\rho a - \rho g)}{\rho a}} \quad [4]$$

avec

- ∅ = diamètre du nuage
- ρa = masse volumique de l'air
- ρg = masse volumique du gaz
- g = accélération de la pesanteur

Pour les débits de fuite considérés (1kg/s), l'expérience suggère fortement ainsi que nos propres essais que le diamètre du nuage est de l'ordre de 10 m, parfois beaucoup plus. Il en résulte que les forces d'Archimède seraient capables d'induire un mouvement advection vertical de quelques m/s soit du même ordre de grandeur que la vitesse de convection du vent.

Par ailleurs, eu égard aux mécanismes de la dispersion, intimement liés à la turbulence induite par ces phénomènes, on admet que le calcul du nombre de Richardson permet de "poser" les incidences respectives des turbulences induites par les forces d'Archimède d'une part et par le vent d'autre part :

$$\mathrm{Ri} = \frac{g\phi(\rho g - \rho a)}{\rho a U^{*2}} \quad [5]$$

Le nombre représente le rapport entre l'énergie potentielle de turbulence due aux forces d'Archimède et l'énergie turbulente atmosphérique. Lorsque Ri <<O, les forces d'Archimède ont un rôle prépondérant.

Avec U* = 0,3 m/s et ρg = 0,9 on obtient Ri = -27,5 ∅

Compte tenu des tailles probables des nuages, il en résulte que les forces d'Archimède semblent avoir une influence importante sur le processus de dispersion. Cet effet est d'autant plus important que la taille du nuage est grande.

Utilisation des outils de modélisation de la dispersion atmosphérique

Avec les modèles de type "intégral", le processus de dispersion est modélisé en deux étapes :

- une première où sont résolues des équations simplifiées de la mécanique des fluides pour estimer la dilution, tant que la masse volumique du mélange est trop éloignée de celle de l'atmosphère environnante
- une seconde où sont mises en œuvre des relations de diffusion atmosphérique où on suppose que la répartition des espèces chimiques soit une loi de répartition "gaussienne"..

Dans de tels modèles, l'usage montre qu'il est hasardeux d'introduire l'effet des forces d'Archimède de gaz plus légers que l'air sans procéder à des calages sur essais en grand.

Avec les modèles tri-dimensionnel de type CFD qui résolvent les équations de Naviet-Stokos, il est possible d'introduire un terme de production de la turbulence sous l'effet des gradients de vitesse. A ce jour, ces logiciels paraissent tous sous estimer la diffusion turbulente. Il est possible que cela provienne d'une prise en compte insuffisante des effets de poussée d'Archimède.

4 Essais réalisés

4.1 Instrumentation mise en place

4.1.1 Mesure des concentrations

Les critères généraux de choix des techniques de mesure de la concentration pris en compte sont les suivants :

- un nombre de capteurs important (une centaine) est indispensable pour déterminer la forme et le volume de nuage,
- une densité importante de capteurs doit être installée notamment à proximité du point d'épandage.

Différentes techniques ont été étudiées : cathatomètrie, diffusivité thermique, spectrographie, techniques optiques, analyse d'oxygène.

Nous avons retenu une technique par thermométrie. Epandu sur le sol, un gaz cryogénique s'évapore à son point d'ébullition. Si le gaz considéré est léger, comme l'hydrogène ou l'hélium, une particule de gaz issue de la nappe liquide en ébullition se mélange avec des quantités croissantes d'air en quelques secondes d'après le retour d'expérience (Witscofski et al., 1984, Albers et al., 1996). Compte tenu de la rapidité du phénomène, on peut supposer que le mélange s'effectue de manière adiabatique. Le principe a été mis à profit par Witcofski lors de sa campagne d'essai.

Pour valider cette technique, nous avons réalisé des essais préliminaires avec des petites fuites d'hydrogène et d'hélium cryogénique. Lors de ces essais nous avons mesuré simultanément, en un même point, la température (thermocouple) et la concentration (spectrographie de masse). Une relation univoque entre les concentrations et les températures a été notée et une corrélation théorique satisfaisante a été obtenue en supposant que les condensas restent en équilibre thermique et aérodynamique avec la phase gazeuse (Figure 2).

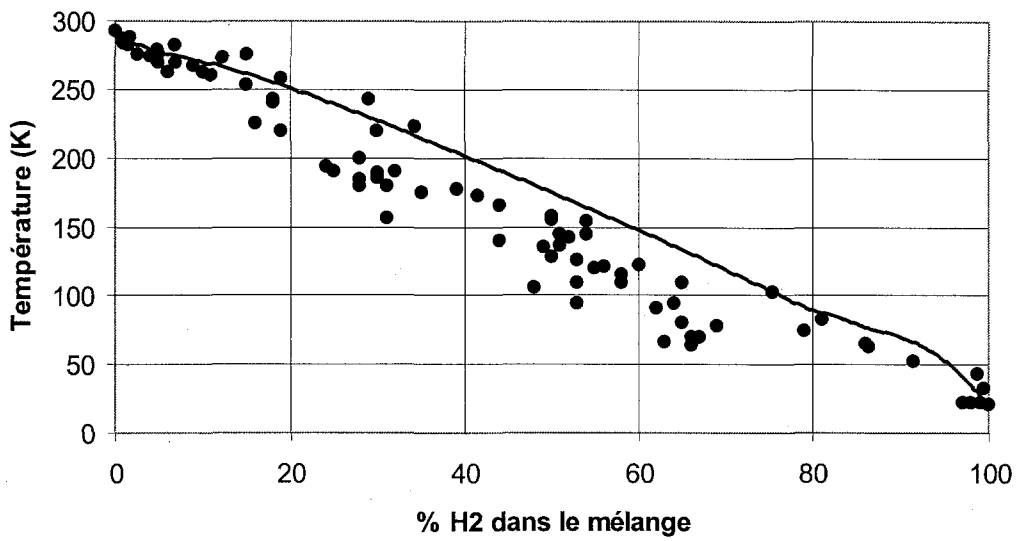

Figure 2: Courbe donnant la concentration en fonction de la température

Les thermocouples choisis sont de type K (Chromel - Alumel) qui présentent une solidité suffisante et conservent une bonne sensibilité à très basse température. La tête de mesure a été choisie de 250 μm afin d'obtenir un temps de réponse de l'ordre de 100 ms.

Afin d'optimiser la répartition des capteurs, nous avons utilisé un utilitaire de traçage de courbes isovaleurs (logiciel SURFER), (C. Proust and al., 1995).

4.1.2 Mesure de la turbulence

Les critères de choix des techniques de mesure de la turbulence pris en compte sont les suivants :

- compte tenu des conditions d'essai envisagées, les tailles des tourbillons et les vitesses prévues sont importantes : taille de l'ordre de 1 à 10 m et vitesse de l'ordre de 5 m/s,
- les capteurs doivent pouvoir être utilisés en milieu agressif,
- plusieurs points de mesures doivent être équipés simultanément ce qui requiert un appareillage de coût raisonnable.

Différentes techniques seraient utilisables pour réaliser de telle mesures : anémomètrie à fil chaud, anémomètrie Doppler Laser, sonde "bidirectionnnelle". C'est cette dernière technique que nous avons retenu.

Une description de ce type de sonde est donné dans un article de McCaffrey (Taminini et al., 1998), l'INERIS utilise ces sondes dans des études de ventilation et d'incendie. Une telle sonde fonctionne selon le principe du titre "Pitot". On mesure la différence de pression de part et d'autre d'une membrane placée dans un tube. La différence de pression est proportionnelle à la force appliquée par l'écoulement sur la paroi centrale et cette force est directement proportionnelle à la pression dynamique (au coefficient de traînée près). Dans le cadre de ces travaux nous avons réalisé une étude fine sur les performances de ces sondes, eu égard à la mesure de la turbulence.

Une première série d'essais a été réalisée en vue d'étalonner ces dispositifs et d'examiner l'incidence de la géométrie de la sonde sur des performances. Il ressort de ces essais effectués dans la soufflerie de l'INERIS (diamètre de la veine de 1 m, vitesse variable entre 0,1 et 20 m/s), que :

- l'incertitude est de l'ordre de 1 %,
- dans un secteur angulaire de ± 45°C, l'incidence de l'inclinaison de l'axe de la sonde par rapport à la direction de l'écoulement est non significative .

Une seconde série d'essais a été effectuée pour tester l'aptitudes de ces sondes à la mesure de la turbulence. Pour ces essais nous avons placé une sonde dans un jet libre subsonique en faisant varier la pression de l'écoulement et la distance sonde/diaphragme. Nous avons pu comparer les mesures à des valeurs théoriques déterminées par des modèles précis. Cette comparaison a donné des résultats tout à fait satisfaisants.

4.2 Dispositif d'expérimental

4.2.1 Mesures effectuées

Une structure support constituée par un filet presque rectangulaire de longueur 130 m et de hauteur variable entre 40 et 60 m, maintenu verticalement entre les mâts de deux grues de levage, a été placée selon la direction du vent. Cette structure supporte 130 thermocouples et 5 sondes "bi-directionnelle".

Le système d'acquisition est composé de 7 centrales d'acquisition de type SCXI de National Instruments de 32 voies, enfermées dans des boîtiers étanches conçus spécifiquement. Ces centrales sont reliées à un ordinateur central qui effectue l'acquisition et le traitement des données.

Un logiciel spécifique a été mis au point sous LABVIEW pour l'acquisition et le traitement des données. La fréquence d'acquisition est de 10 H_z et la durée d'acquisition de 2 minutes.

Les conditions météorologiques sont contrôlées pendant les essais à l'aide d'une mini-station météo.

Les essais ont été filmés pour visualiser le développement du nuage au cours du temps.

4.2.2 Dispositif d'épandage

L'équipe d'épandage était constitué de deux citernes routières d'hélium liquide (40 m^3 unitaire), d'une citerne routière d'hélium gazeux et de tuyauteries de liaison. Pour chaque citerne, une canalisation d'épandage isolée par le vide a été fabriquée. Elle est reliée à un diffuseur dont la finalité est de réduire la vitesse de sortie du fluide.(Photo 1)

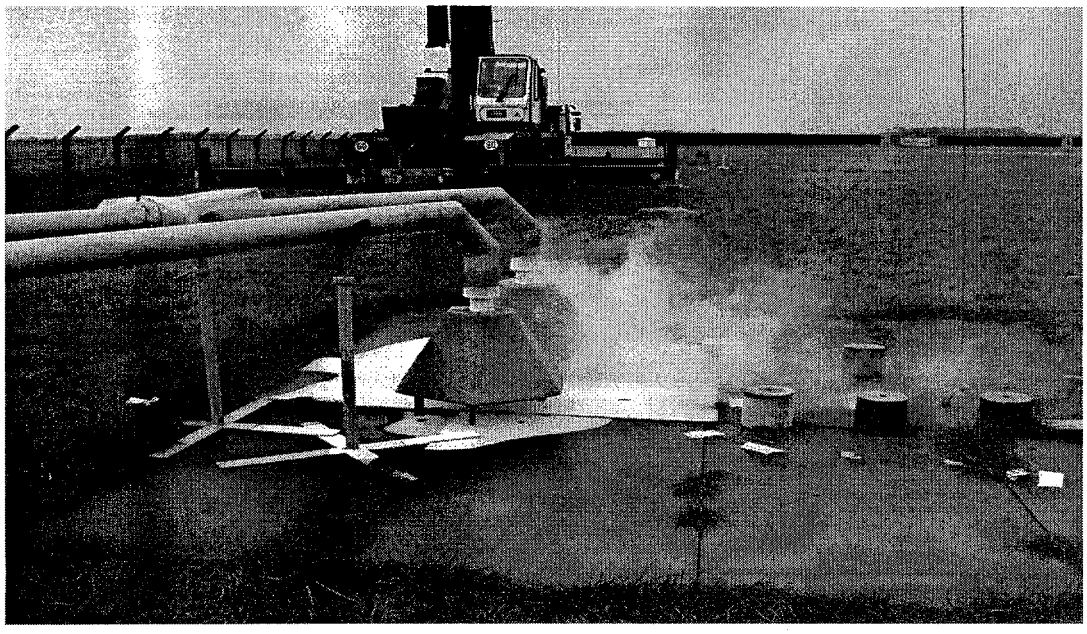

Photo 1 : Dispositif d'épandage

L'épandage est réalisé sur une plaque métallique de 5 m x 4 m.

4.3 Résultats des essais

4.3.1 Similitudes hydrogène/hélium

L'hélium liquide, comme l'hydrogène, se vaporise à une température très basse (point d'ébullition de l'ordre de 3.4 K pour l'hélium et 20 K pour l'hydrogène), donc la vaporisation est très intense et la taille de la flaque formée reste faible par rapport à la taille du nuage.

Une comparaison de la densité des mélanges air/hélium et air/hydrogène montre quelles sont proches pour des concentrations inférieures à 50 %. Pour des mélanges plus riches, les évolutions sont différentes et les mélanges air/hélium sont plus lourds. De tels mélanges ne sont observés qu'au voisinage immédiat de la nappe où les dimensions du nuage paraissent insuffisantes pour que se manifestent les effets de la pesanteur, d'une part et où, d'autre part, d'autres mécanismes de mélanges interviennent prioritairement comme la turbulence locale.

Il en résulte une similitude remarquable entre les panaches issus des épandages d'hélium liquide et d'hydrogène liquide si les débits exprimés en moles/s sont identiques. Cela signifie donc que le nuage produit au moyen d'un débit de fuite de 4 kg/s d'hélium aurait les mêmes caractéristiques que celui issu de l'épandage de 2 kg/s d'hydrogène cryogénique, compte tenu des différences de masses molaires.

4.3.2 Essais réalisés

Dix essais ont été réalisés selon les conditions reportées dans le tableau 2

Essai n°	Durée fuite (s)	Débit (kg/s)	Vents (m/s) à 3 m / sol	Humidité (%)	Température (°C)
préliminaire	60	1.5	6	/	/
1	50	1,4	4,0±1,0	86	17
2	52	1,4	5,2±1,0	90	17
3	52	2,1	3,0±0,5	84	12
4	43	2,1	4,0±0,5	84	12
5	34	2,1	5,5±0,5	88	12
6	43	2,1	4,5±0,5	88	11
7	70	1,2	2,0±0,5	88	15
8	60	1,2	2,4±0,7	88	15
9	60	2,3	*2,0±0,5*	88	15

Tableau 2 : Conditions des essais réalisés

Le dispositif d'épandage a permis de faire des essais avec des débits compris entre 1,3 kg/s et 2,5 kg/s, en présence de vents dont la vitesse était comprise entre 2 et 6 m/s.

4.4 Interprétation des essais

4.4.1 Vaporisation de l'hélium

Les essais ont permis d'obtenir deux valeurs pour la dimension de la nappe liquide. On a constaté que la surface de la nappe (tableau 3) semble s'établir rapidement et conserve ensuite ses dimensions pendant plusieurs dizaines de secondes. Enfin, les flux calorifiques prélevés par l'évaporation sont conservés d'un débit d'épandage à l'autre.

Débit (kg/s)	1,5	2,1
Diamètre nappe (m)	3	5
Flux thermique (Kw/m^2)	16	14

tableau 3 : Vaporisation sur la plaque

Ces flux sont très proches du point de Leidenfrost et confirment donc la modélisation proposée ci-avant.

4.4.2 Forme et structure du nuage

Un exemple typique de nuage est présenté sur la Photo 2

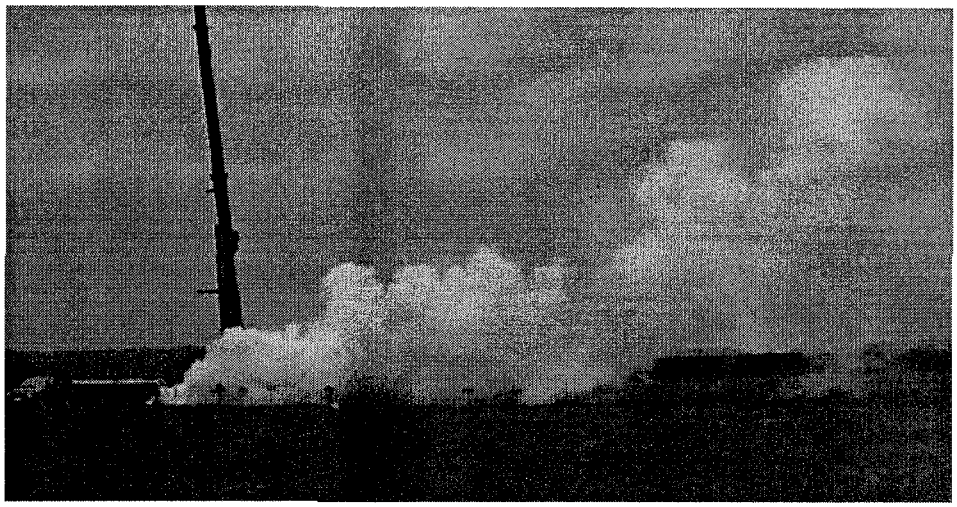

Photo 2 : Exemple de nuage (débit = 1,2 kg/s, vent = 2 m/s, essai 7)

La forme visible du nuage est caractérisée par trois paramètres :

- L, la longueur du nuage
- H_1, la hauteur au sol de la base du nuage
- H_2, la hauteur au sommet du nuage

Ces essais montrent que ces caractéristiques dépendent essentiellement du débit et peu de la vitesse du vent (Cf. Tableau 4)

- débit 1,5 à 2,3
- L 55-60 à 75-80 m
- H_1 5 - 10
- H_2 15 - 35

Essai n°	Durée fuite (s)	Débit (kg/s)	Vents (m/s) à 3 m / sol	H1 (m)	H2 (m)	L (m)
prél.	60	1,5	6	ND	ND	ND
1	50	1,4	4,0±1,0	5	17	60
2	52	1,4	5,2±1,0	5	17	60
3	52	2,3	2,7±0,3	12	32	80
4	43	2,3	4,0±0,5	7	35	75
5	34	2,3	5,5±0,5	7	30	70
6	43	2,3	4,5±0,5	7	30	70
7	70	1,2	2,0±0,5	ND	ND	55
8	60	1,2	2,4±0,7	ND	ND	55
9	60	2,3	2,0±0,5	ND	ND	70

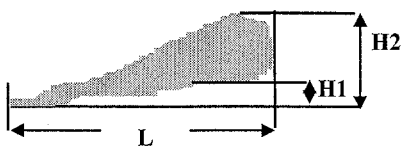

Tableau 4 : Conditions d'essais d'épandage d'hélium et paramètres caractéristiques de la forme du nuage visible

4.4.3 Concentration

Un exemple typique du signal fournit par les thermocouples après opération de filtrage est donné en Figure 3:

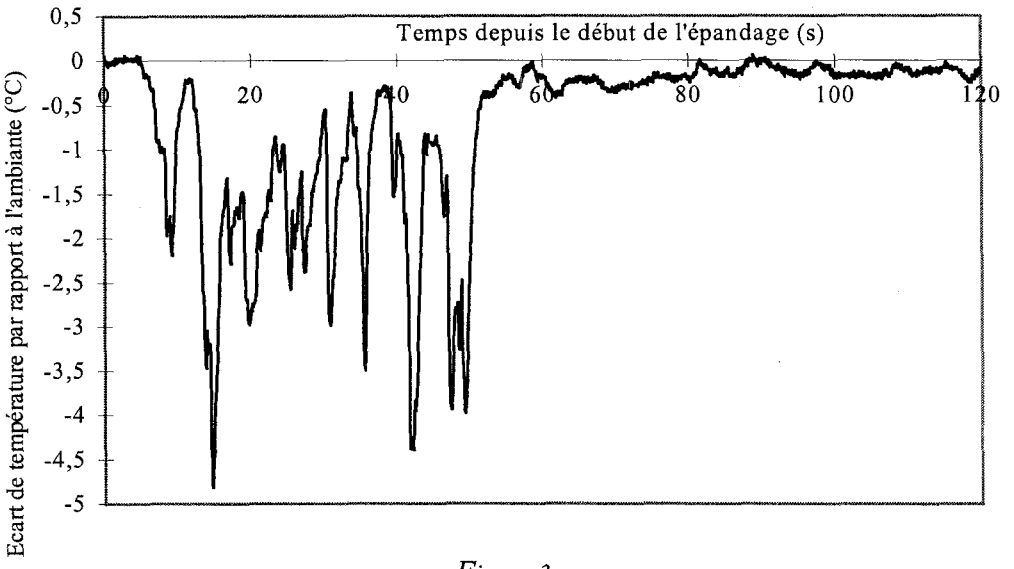

Figure 3 :
Exemple de signal fourni par les thermocouples
(essai n° 3, thermocouple disposé au sol à 4 m du point d'épandage)

On observe que les signaux sont très irréguliers. Cette situation qui correspond à des phénomènes réels et non à des difficultés de traitement du signal, indique que le nuage est localement très hétérogène. On remarque que la période de ces variations (5 secondes) est beaucoup plus petite que celle due à la turbulence atmosphérique, évaluée à 10 secondes au moins d'après les enregistrements de température effectués loin du nuage. Une analyse plus fine montre que cette fluctuation est reliée au diamètre du nuage.

Sur la Figure 4, nous avons représenté un exemple de tracé de courbes d'iso valeur déduite des enregistrements. On constate que la courbe d'iso valeur -1°C point de rosé de l'atmosphère semble correspondre globalement à l'enveloppe visible du nuage.

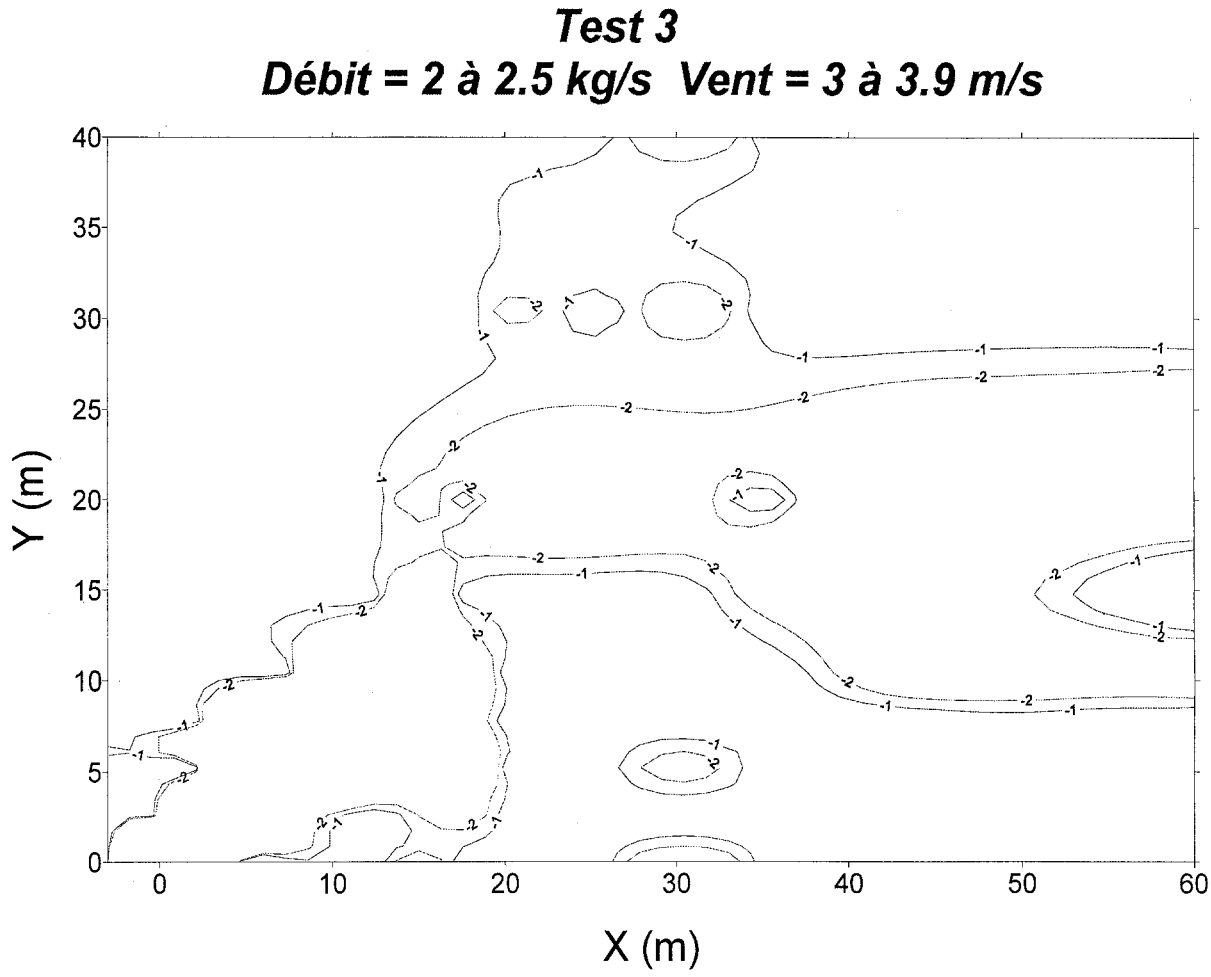

Figure 4 Exemple de tracé de courbes d'iso-valeur

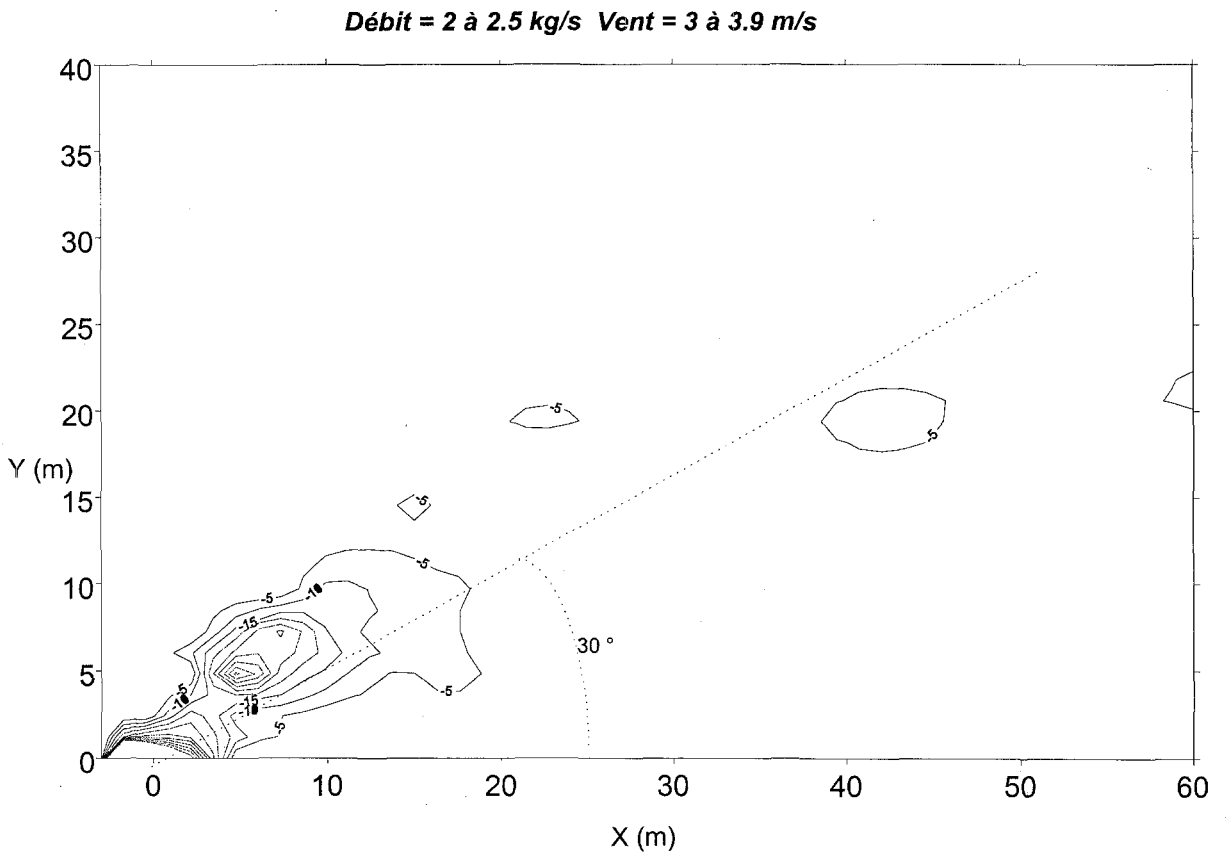

Figure 5 Exemple d'isoconcentration

En utilisant la corrélation température concentration définie lors des essais préliminaires de validation de la technique de mesure, la courbe d'isocentration +4% correspond à l'isotherme - 6° C et se trouvent nettement en retrait de la frontière -1°C. Cela signifie que dans les concentrations d'humidité des essais, (≈ 80 %), la zone "explosive" du nuage (s'il s'agissait d'hydrogène) serait nettement plus restreinte que le panache visible du nuage.

Les mesures montrent (Figure 5) que, dans la zone située à quelques mètres du point d'épandage, les températures sont plus basses que -50°C, les concentrations du nuage en hélium doivent être plus grandes que 30 % et la masse volumique des nuages doit être minimale, de l'ordre de 1,1 kg/m^3. Au delà de cette zone, la densité est proche de celle de l'atmosphère.

Une estimation de la zone "explosive", selon les essais donne en fonction du débit les ordres de grandeurs suivants :

- pour un débit de 1,2 à 1,4 kg/s le diamètre est de l'ordre de 5 m et la longueur de 9 à 12 m,
- pour un débit de 2,3 kg/s le diamètre est de l'ordre de 8 m et la longueur de 20 m.

4.4.4 Aéro-dynamique du nuage

Les fluctuations de vitesse dans le nuage sont de l'ordre du mètre par secondes alors que la turbulence atmosphérique est plutôt de maximum 0,3 à 0,5 m/s. Les forces internes du nuage jouent donc un rôle prépondérant dans la dispersion.

On peut de plus vérifier que des niveaux de turbulence interne sont proches des vitesses ascensionnelles du nuage, ce qui suggère nettement qu'il s'agit de l'effet des forces d'Archimède. On envisage donc facilement que pour des débits plus élevés, l'effet de ces forces et de la turbulence induite soit d'autant plus intense.

5 CONCLUSION

L'estimation du comportement de la nappe d'hydrogène liquide ne semble pas poser de problèmes particulières et des modèles simples peuvent être utilisés.

En revanche, la simulation de la formation du nuage n'est pas correctement appréhendée par les outils disponibles à ce jour et classiquement mis en œuvre dans les études de sécurité.

Au stade actuel de l'exploitation des résultats (C. Proust, 2000) des modèles analytiques utilisant la technique des profils "auto-semblables" à l'instar de la théorie des jets, sont envisageables.

Toutefois, des essais de calage sur des essais en grand avec de l'hydrogène cryogénique devront être réalisés.

Les essais réalisés dans le cadre de ce programme montrent que les moyens d'expérimentation sont adaptés pour réaliser une telle campagne d'essais.

Une connaissance suffisante de la forme, du volume et de la turbulence interne du nuage est une étape fondamentale avant de pouvoir prédire les effets de pression induits par l'explosion.

Des travaux en parallèle sur les vitesses d'accélérations de flammes en fonction de la turbulence et du gradient de température ont été conduits à l'INERIS (C. Proust, 2000). et suggèrent des régimes de déflagrations violents.

BIBLIOGRAPHIE

Albers P. et al. (1996),
Simulation der Ausbrestungsvorgänge beim plötzichen Austritt von Helium aus dem Kryohenischem system des surpraleitenden protonenmagnetringens im hera-tunnel, Deutsches Elektronen-synchroton. Desy, Hambourg, Allemagne.

Cassut et al., (1961),
A study hazard in the storage and handling of liquid hydrogen, Advances in cryogenic Engineering, Vol. 5, pp 55-61.

Davidson Harrisson(1971),
Fluidization, Academics Press - New York.

Delhaye et al. (1981),
Thermohydraulics of two phase systems for Industriel Design and Nuclear Engineering, McGraw-Hill, 1981.

D. Gaston, C. Proust (1994),
Mécanismes de dispersion et d'explosion lors de fuites d'hydrogène liquide, INERIS documentation, Nov. 94.

Hanna et al., (1987),
Guidelines for use of vapor cloud dispersion models, Center of Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers, New York.

V.I. Makeev, V.F. Pleshakov, A.P. Chuguer (1981),
Formation and combustion of hydrogen-air mixture in processes Comb. Expl. and shock waves, Vol. 17.

C. Proust, D. Gaston (1994).
Mécanismes de dispersion lors de fuites d'hydrogènes liquide, INERIS documentation, Juin 1994.

C. Proust, B. Chuuon (1995),
Traitement des données projet hydrogène liquide, INERIS documentation, Décembre 1995.

C. Proust (2000),
Mécanismes de dispersion et d'explosion lors de fuites d'hydrogène liquide. Rapport final, INERIS, documentation, Avril 2000.

Riou (1989),
Comment estimer la dispersion de gaz lourd, EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série A n°1, pp 23-60.

Schmidtchen et al. (1992),
Safe handling of large quantities of liquid hydrogen, Engineering and cryogenics conferences, Southampton.

Tamini et al. (1998),
Turbulent unvented gaz explosions under dynamic mixture injection conditions, 23rd Symp. of combustion, pp 851-858

Verfondern (1981),
Hygrogen as an energy carrier and its production by nuclear power, Intend Report, Jülich Research Center, Germany, oct 1997

R.D. Witcofski, J.E. Chirivella (1984),
Experimental and analystical analyses of the mechanisms governing the dispersion of flammable clouds formed by liquid hydrogen spill, Int. J. Hydrogen Energy. Vol. 9, pp 425-435.

Zabetakis et al. (1961),
explosion hazards of liquid hydrogen, Advances in Cryogenics Engineering, Vol. 6, pp. 185-194.

Association Amicale des anciens Elèves de l'Ecole de Thermique, 3 rue Henri Heine- 75016 PARIS , 1982.
Aide mémoire du thermicien A^3. E^2 ,