

Explosion d'un réservoir d'hydrogène

1^{er} octobre 1988

Saint-Fons (Rhône)

France

Equipements sous pression
Explosion
Rupture
(d'équipements)
Hydrogène
Corrosion

LES INSTALLATIONS CONCERNÉES

Le site :

L'usine est affiliée à un groupe français synthétisant des produits chimiques et pharmaceutiques. Implanté sur plusieurs dizaines d'hectares des rives du Rhône, au sud de Lyon et à proximité de la raffinerie de Feyzin, le site emploie plusieurs centaines de personnes.

Les installations :

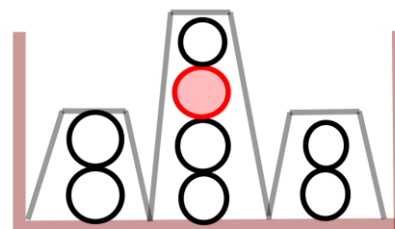
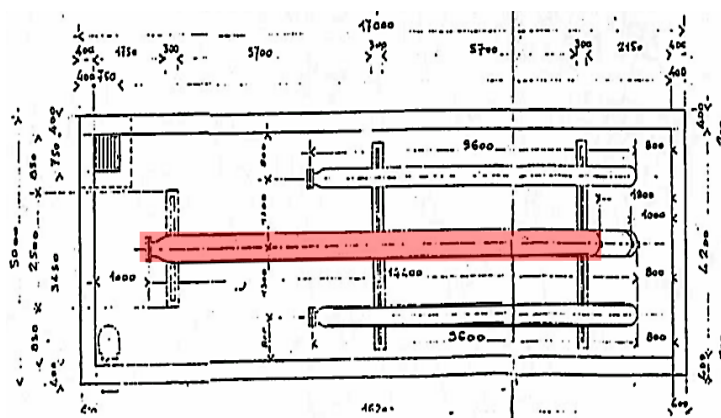
L'unité impliquée est un stockage d'hydrogène (H₂) qui alimente plusieurs ateliers. Produit dans une usine voisine, le gaz transite dans une capacité tampon de 70 m³, puis alimente le stockage par une canalisation de 35 bars. L'H₂ est comprimé à 150 bars avant d'être stocké dans 8 bouteilles cigares (35 m³ au total) isolables du reste du circuit d'alimentation par une vanne pneumatique se fermant automatiquement en cas d'arrêt d'urgence ou par manque d'air.

Les réservoirs sont implantés dans une fosse bétonnée, creusée dans le flan d'un talus et protégée par une toiture en fibrociment, aux dimensions suivantes :

- Longueur : 17 m ;
- Largeur : 5 m ;
- Hauteur : 3,6 m (partie enterrée : 2,2 m) ;
- Distance par rapport au bâtiment le plus proche : environ 15 à 20 m ;
- Distance par rapport à la voie rapide : 350 m.

La bouteille accidentée a comme caractéristiques :

- Diamètre extérieur : 0,57 m ;
- Epaisseur de paroi : 12,6 mm ;
- Longueur : 15 m ;
- Volume : 3 m³ (3 000 litres) ;
- Pression de service : entre 120 et 150 bars (utilisation en accumulateur) ;
- Dernière épreuve hydraulique de la bouteille en 1985 à 225 bars ;
- Matériau : acier standard présentant une densité de 7850 kg/m³ ;
- Elle a été forgée en 1939 par un constructeur allemand.



Vues du dessus et de face de la fosse

La bouteille était au milieu de la fosse et au-dessus de 2 autres bouteilles

L'ACCIDENT, SON DÉROULEMENT, SES EFFETS ET SES CONSÉQUENCES

L'événement survient un samedi matin vers 6 h. L'usine est alors pratiquement vide, mais le déroulement de l'accident pourra néanmoins être reconstruit à partir des témoignages des rares opérateurs présents :

Phase 1 : La fuite gazeuse

Un sifflement intense provenant du stockage d'hydrogène est perçu à 6h05 et durant 20 à 40 s.

Phase 2 : L'explosion

Le nuage d'H₂ s'enflamme. Une boule de feu rouge orangé, très lumineuse et d'un diamètre de 15 à 20 m est visible entre 6h05 et 6h08. Des témoins présents dans une salle de repos à 100 m de la fosse ressentent une onde de souffle et une sensation de chaleur. L'hydrogène des réservoirs connexes brûle également jusqu'à épuisement.

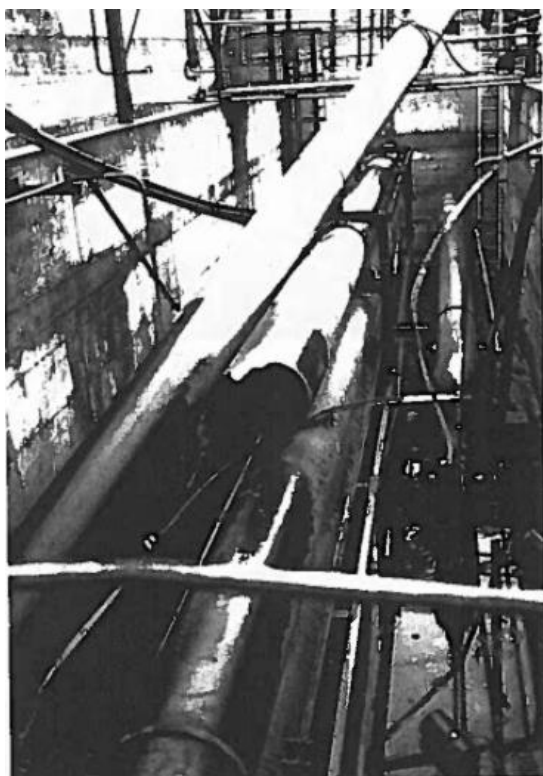
Phase 3 : L'intervention des secours

Les pompiers sont alertés et l'unité est arrêtée via un interrupteur « coup de poing » à 6h08.

A l'arrivée des secours, il est constaté :

- Un incendie dans la fosse sur environ 2/3 de sa surface ;
- Un front de flamme sur une hauteur variant entre 3 et 4 m.

La fosse est noyée avec de la mousse. La canalisation d'H₂ alimentant le stockage est isolée.



Vue de la fosse après l'accident et de la bouteille reconstituée pour expertise – Droit réservé

Les conséquences :

Survenue à un moment moins favorable, l'explosion aurait pu provoquer des dommages corporels hors du site. Le souffle de l'explosion a provoqué des dommages matériels :

- Bris de vitres ou de vitrines sur 515 m ;
- Détériorations de bardages, cloisons ou plafonds sur 350 m ;
- Déplacements de tuiles sur 280 m.

Les effets thermiques de la boule de feu sont quasi inexistants :

- Brûlures des supports, des bouteilles et des montants métalliques du toit de la fosse de stockage ;
- Echauffement (voire léger roussissement) des mousses sèches tapissant le mur de l'atelier le plus proche.

Une dizaine de fragments de bouteilles seront retrouvés après l'accident : 6 dans la fosse et 2 hors de l'usine (jusqu'à 150 m). L'un de ces fragments a sectionné la canalisation d'air comprimé alimentant la vanne d'isolement du stockage.

Propulsée du côté opposé à sa rupture (en direction de Saint-Fons), la bouteille qui a explosé est venue percuter le mur Est de la fosse, puis est repartie dans le sens inverse.

Échelle européenne des accidents industriels :

En utilisant les règles de cotation des 18 paramètres de l'échelle officialisée en février 1994 par le Comité des Autorités Compétentes des États membres pour l'application de la directive 'SEVESO' et compte-tenu des informations disponibles, l'accident peut être caractérisé par les 4 indices suivants :

Matières dangereuses relâchées		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conséquences humaines et sociales		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conséquences environnementales		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conséquences économiques		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

L'indice 'Matières dangereuses relâchées' est égal à 2 en raison des bris de vitres observés sur une distance comprise entre 330 et 700 m (paramètre Q2). Les autres indicateurs ne sont pas renseignés car aucun impact sur l'environnement n'a été relevé après l'accident. Aucune victime humaine n'a par ailleurs été recensée. Enfin, le montant des dégâts matériels n'étant pas connu, l'indicateur 'conséquences économiques' n'est pas complété.

Les paramètres de ces indices et leur mode de cotation sont disponibles à l'adresse : <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>.

L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT

La fragilisation de l'acier par l'hydrogène est la première hypothèse émise pour expliquer la rupture brutale du réservoir sous pression au niveau du 1^{er} quart de sa longueur (coté robinet). Les dommages observés sur les installations peuvent s'expliquer par l'énergie potentielle emmagasinée dans la bouteille (produit Pression*Volume) et sa libération brutale lors de la rupture (explosion pneumatique). En revanche, un modèle reposant sur l'équivalent TNT de la masse d'H₂ contenu ne peut expliquer les dégâts observés.

Une expertise conclut à une rupture différée (fatigue statique) de la bouteille par fragilisation de l'acier sous l'effet de l'H₂ au niveau du berceau de supportage avant. Il s'agissait d'une bouteille recyclée, déjà utilisée sur d'autres sites, comme réserve d'azote notamment. Les différents documents constituant le dossier de l'appareil à pression ne donnent aucune indication précise sur la nature du métal le constituant.

Le laboratoire d'analyse métallographique note plusieurs facteurs ayant contribué à la rupture de la bouteille :

- Les **caractéristiques relativement élevées de l'acier** ($R_m > 1\ 000\text{MPa}$) ;
- La présence de **martensite aciculaire** synonyme d'un traitement thermique de revenu réalisé à basse température, or les **structures adaptées à l'hydrogène sont plutôt globulaires** obtenues avec des traitements thermiques à hautes températures ;



Structure matensitique aciculaire de l'acier de la bouteille après attaque au Nital – Droit réservé

- La surface de la paroi interne de la bouteille présente des **piqûres**, voire des **cratères de corrosion**. Le relief accidenté résultant de cet état augmente la surface de contact entre l'acier et l' H_2 , et facilite l'adsorption de ce gaz. La profondeur des piqûres entraîne par ailleurs une augmentation locale des contraintes (effet d'entaille, diminution de la section où les forces s'appliquent).



Zoom sur la corrosion par l'hydrogène :

- La diffusion de l'hydrogène dans les aciers entraîne une fragilisation qui est d'autant plus à craindre que l'acier possède une forte résistance mécanique ;
 - L'hydrogène diffuse dans les métaux sous sa forme atomique ;
 - La concentration en atome d'hydrogène dépend de la température et de la pression ;
- Selon la température, 3 phénomènes sont rencontrés :
- A plus de 200°C (haute température), la décarburation de l'acier avec fissuration intercrystalline ;
 - A basse température :
Baisse des capacités de déformation et augmentation du risque de rupture ;
Formation de cloques (hydrogen blistering en anglais).

LES SUITES DONNÉES

Pour des raisons économiques, l'activité des unités raccordées au stockage reprend très vite. Celles-ci seront notamment alimentées directement via une canalisation existante de 35 bars. Avant sa mise en service, un essai d'étanchéité à l'hélium suivi d'un essai hydraulique couplé à une recherche de fissures externes par ressuage sont réalisés sur cette canalisation. Des essais de flexion par choc (résilience) et des examens cristallographiques complètent ces tests. Tous les examens réalisés ne montrent pas de traces de fragilisation à l'hydrogène.

Après cet événement, l'inspection des installations classées recense les stockages du même type en région Rhône-Alpes. Une attention particulière est accordée aux équipements anciens et à leur vécu, ainsi qu'aux caractéristiques et à la composition des aciers. Près de 80 défauts internes sont ainsi détectés sur l'un des hydrogénéurs construit en alliage Hastelloy du site où s'est produite l'explosion.

Parallèlement aux contrôles réalisés, l'exploitant élabore de nouvelles procédures d'exploitation de ses canalisations d'hydrogène, elles concernent notamment :

- Leur mise en sécurité en cas de problème (brûlage de l'hydrogène pour ramener la pression à 1 bar puis purge à l'azote) ;
- La phase de mise sous pression d'hydrogène.

Deux vannes de sectionnement automatiques asservies à des manomètres indépendants sont installées pour protéger l'alimentation d'un hydrogénéur.

Méthode utilisée pour contrôler les hydrogénéurs au regard du risque de fragilisation par l'hydrogène :

- Mesure de dureté de la paroi intérieure ;
- Répliques métallographiques internes et externes ;
- Contrôle à 100 % des soudures par la méthode des courants de Foucault ;
- Contrôle par ultrasons (maillage de 50 mm * 50 mm) pour détecter les défauts internes ;
- Inspection visuelle complétée par endoscopie.

LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS

Plusieurs facteurs contribuent à la fragilisation de l'acier par l'hydrogène dans l'accident de Saint-Fons :

- La pression qui accentue le phénomène d'adsorption active de l'hydrogène à la surface de l'acier ;
- La pureté des gaz d'hydrogène utilisés pourrait être même un facteur déterminant dans le déclenchement du phénomène de fragilisation par l'hydrogène. Le gaz utilisé sur le site ne contenait qu'une très faible teneur d'oxygène (0,5 ppm) ce qui peut aggraver le phénomène de fragilisation par l'hydrogène. L'oxygène joue un rôle d'inhibiteur par rapport à ce phénomène ;
- Le niveau de sollicitation de l'enveloppe de la bouteille au niveau de son supportage, la bouteille étant utilisée comme un accumulateur ;
- Les caractéristiques de l'acier de la bouteille ;
- La taille très réduite de la molécule de dihydrogène qui peut diffuser facilement et des conditions très différentes entre l'utilisation première du réservoir (stockage de N₂) et celui fait dans l'usine (stockage de H₂).

Ces derniers points soulignent tout l'intérêt à apporter à l'élaboration des dossiers des équipements sous pression, notamment sur les caractéristiques des aciers. Ces éléments méritent d'être reconstitués en particulier pour les équipements anciens. A défaut, leur remplacement doit être envisagé. Par ailleurs, il convient de vérifier si leur recyclage dans le cadre d'un nouveau procédé ne pose pas de problème.

Enfin, les conditions d'exploitation d'un appareil sous pression, notamment dans le cas d'une utilisation en réservoir accumulateur, méritent d'être analysées eu égard aux phénomènes de fatigue.

Pour aller plus loin dans la maîtrise des risques liés à l'hydrogène, une synthèse ainsi qu'une liste d'accidents sont téléchargeables à l'adresse suivante :



<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/syntheses/par-theme/accidentologie-de-lhydrogene/>